



**Titre:** Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences d'un  
Title: biocarburant de deuxième génération à base de saule

**Auteur:** Shirley Fagnen  
Author:

**Date:** 2009

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Fagnen, S. (2009). Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences d'un  
Citation: biocarburant de deuxième génération à base de saule [Mémoire de maîtrise,  
École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/204/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/204/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Réjean Samson, Pascal Lesage, & Ralph Rosenbaum  
Advisors:

**Programme:** Génie chimique  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE AXÉE SUR LES CONSÉQUENCES D'UN  
BIOCARBURANT DE DEUXIÈME GÉNÉRATION À BASE DE SAULE**

SHIRLEY FAGNEN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CHIMIQUE)

DÉCEMBRE 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE DU CYCLE DE VIE AXÉE SUR LES CONSÉQUENCES D'UN  
BIOCARBURANT DE DEUXIÈME GÉNÉRATION À BASE DE SAULE

présenté par : FAGNEN Shirley

en vue de l'obtention du diplôme de : Maitrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LEGROS Robert, Ph. D., président

M. SAMSON Réjean, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. LESAGE Pascal, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. ROSENBAUM Ralph, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme GAUDREAULT Caroline, Ph. D., membre

*À mes parents et à ma famille.*

## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche le Pr Réjean Samson, pour m'avoir confié ce projet de maîtrise qui m'a permis de me spécialiser dans un domaine qui désormais me tient beaucoup à cœur. Je souhaite aussi remercier le Dr Ralph Rosenbaum et le Dr Pascal Lesage, pour leurs conseils, leur disponibilité et leur encadrement tout au long du projet.

Grâce à M. Francis Allard, d'Agroénergie, et à M. Michel Labrecque du Jardin Botanique de Montréal, le projet a pu bénéficier de données primaires permettant plus de réalisme dans cette étude, je souhaite donc les remercier. De même, je souhaite adresser mes remerciements à la FAPRI Missouri, à la Fédération des Producteurs des Cultures Commerciales du Québec, à l'US Department of Agriculture, à Agriculture Canada, à l'Association des cultivateurs de maïs du Manitoba (Manitoba Corn Growers Association), à l'Association des cultivateurs de maïs de l'Ontario (Seed Corn Growers Ontario), à l'Institut International de Nutrition des Plantes (International Plant Nutrition Institute) pour leur disponibilité et pour leur aide.

Je tiens à remercier toute l'équipe du CIRAIG, pour la bonne ambiance et les bons moments passés ensemble ces deux dernières années, je pense spécialement à mes amis du bureau B657 et A683-2, mais aussi à Anick et Stéphanie. Je voudrais aussi exprimer de profonds remerciements à l'équipe, que je qualifierai de « bioénergie/conséquentielle », pour sa grande aide : Alexandre, pour ses connaissances sur les biocarburants, François pour son expertise et ses conseils que ce soit pour Sima Pro, les analyses de biocarburants ou l'ACV-C, Pablo pour nos conversations sur le changement d'utilisation des terres et le carbone biogénique et bien sûr Thomas pour son aide tout au long de mon projet et pour les simulations GTAP, vraiment un grand merci à vous tous, car vous avez toujours été disponibles pour répondre à mes questions et m'aider dans mes moments de doutes. Un merci spécial à Claude et Sandra pour leur aide.

Je voudrais aussi remercier les partenaires de la Chaire internationale en analyse du cycle de vie pour leur soutien financier.

Pour terminer, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien et leur réconfort tout au long de mes études.

## RÉSUMÉ

Ce projet de maîtrise présente une évaluation des impacts potentiels d'une nouvelle source de biocarburant : le saule cultivé à des fins énergétiques. Cette étude a été réalisée en deux grandes étapes. Tout d'abord, une Analyse de Cycle de Vie axée sur les attributs (ACV-A) portant sur de l'éthanol cellulosique à base de saule a été réalisée. Par la suite, une Analyse du Cycle de Vie axée sur les conséquences (ACV-C) est approchée par une extension de frontières prenant en compte les conséquences d'un changement d'utilisation de la terre. Les biocarburants représentent une nouvelle source d'intérêt, mais sont bien souvent critiqués. Représentant un net avantage pour la réduction du changement climatique pour certaines sources de biomasse, les impacts engendrés sur la santé humaine sont souvent problématiques. De plus, ces analyses sont très souvent controversées et accusées de manquer de réalisme. Outre les sources de bioénergie qui sont en elles-mêmes une concurrence avec l'alimentation (maïs, betterave, colza), d'autres ressources peuvent accentuer les pressions sur la disponibilité des terres arables.

Cette étude traite d'une culture de saule au Québec. Ce saule, cultivé comme une plantation à courtes rotations, peut avoir plusieurs utilités. Il est supposé ici que les copeaux de saule serviront à la production d'éthanol. Cet éthanol sera mélangé à de l'essence à hauteur de 85% volumique pour produire un E85 qui sera mis à disposition en Suisse. À première vue, le saule ne provoque pas de concurrence directe avec l'alimentation humaine, et ne nécessite donc pas d'analyse particulière. Une ACV-A, étudiant les impacts potentiels de ce E85 en prenant en compte les processus directement reliés aux étapes de la production du saule jusqu'à l'utilisation dans un moteur flex-fuel semble entièrement suffisante. Cette analyse est donc faite et ses résultats sont présentés dans ce mémoire. Les données utilisées pour la culture du saule proviennent directement du cultivateur québécois et assurent donc une modélisation assez réaliste de la plantation. Ces résultats sont comparés à trois autres produits : de l'essence (pétrole avec un faible taux en soufre), utilisée dans un moteur non modifié, et deux autres biocarburants bien connus, l'E85 à partir d'éthanol de maïs américain, bien souvent étudié et discuté, et l'E85 à partir d'éthanol de canne à sucre brésilien.

Cependant, la culture du saule actuellement exploitée au Québec provient d'un choix volontaire de changement d'utilisation de la terre. Une ferme maraîchère a donc laissé sa place pour cette culture à courtes rotations, engendrant au final un manque de denrées alimentaires : du

maïs, tout usage confondu, au Canada. Afin d'éviter toute polémique face aux résultats de la première analyse, les processus servant à la compensation du maïs manquant vont être intégrés dans l'étude. Les frontières du système de produits sont donc élargies. Les conséquences de ce changement d'utilisation de la terre, donc du choix qui a été fait, sont alors étudiées dans l'ACV qui se qualifie désormais d'axée sur les conséquences. Cette analyse demeure néanmoins partielle, car toutes les conséquences liées à l'utilisation du saule ne sont pas prises en compte, seules celles liées au changement d'utilisation de la terre québécoise le sont.

Ce projet a deux principaux objectifs. Il s'agit tout d'abord d'évaluer et de présenter les impacts potentiels d'un nouveau biocarburant : l'E85 à base de saule, le saule étant une biomasse attirant de plus en plus la recherche. Le second est de parvenir à une étude plus réaliste en réalisant une ACV-C prenant en compte les conséquences du changement d'utilisation de la terre et de comparer les résultats obtenus avec les résultats de l'ACV-A.

L'hypothèse du projet est que l'ACV-C prenant en compte les conséquences du changement d'utilisation de la terre, même avec une approche simplifiée, change nettement les résultats obtenus pour le E85 à base d'éthanol cellulosique de saule canadien. Cette analyse plus complète, évite toute polémique supplémentaire puisque les impacts du changement d'utilisation des terres sont pris en compte.

Le choix de la méthode pour étendre les frontières est une problématique importante puisque aucun consensus n'est pour l'instant établi. Deux possibilités s'offrent alors pour l'analyse : les tests de scénarios ou le recours à l'utilisation de modèles macro économiques. Bien que les modèles apportent plus de réalisme, ils sont très exigeants en temps et ressources. Ce projet étant une première étape vers une analyse plus complète, une approche simplifiée par scénarios est choisie. Dans les travaux qu'il a effectués, Schmidt (2008) étudie, par le biais de six scénarios, les réponses possibles à un manque de blé au Danemark. Un lien peut alors être directement fait avec ce projet qui a besoin d'évaluer comment une diminution de l'offre en maïs au Canada va être palliée. Cette méthode est donc choisie pour parvenir à prendre en compte les effets du changement entre culture de maïs et culture de saule. Cette méthode semble intéressante pour cette première approche, puisque qu'elle considère les principales idées reconnues en ACV-C, notamment que l'économie et les contraintes diverses sont des critères principaux pour la mise en évidence des technologies affectées.

Ce projet présente donc le travail réalisé pour parvenir à une analyse plus pragmatique. L'aspect innovateur réside dans le fait que les deux approches sont ici étudiées, présentées et comparées. Les résultats de l'ACV-A montrent que le E85 à base de saule pourrait être une alternative au pétrole envisageable pour lutter contre le changement climatique ou la consommation de ressources. Néanmoins cet E85 génère plus d'impacts sur la santé humaine ou la qualité des écosystèmes. Ce projet démontre notamment que les résultats obtenus après l'extension des frontières sont différents de ceux de la première analyse. Bien que les impacts soient légèrement augmentés pour la santé humaine (+1,5% par rapport à l'ACV-A), ils sont nettement diminués en qualité des écosystèmes (-42%). Les nouveaux résultats indiquent même un changement de tendance puisque l'E85 devient alors préférable au pétrole pour la qualité des écosystèmes. Cette méthode, bien que simplificatrice à plusieurs niveaux, ajoute du réalisme à l'étude des impacts potentiels de ce nouveau carburant et parvient à valider l'hypothèse de recherche disant que les impacts sont nettement modifiés lors d'une extension de frontières.



## ABSTRACT

This Master's project focuses on the assessment of the potential impacts of a new biofuel resource: willow, grown for energy purposes. This study has been conducted following two main steps. First, an attributional Life Cycle Assessment (A-LCA) on cellulosic ethanol made from willow was performed. Then, a consequential LCA (C-LCA) was carried out using a system expansion regarding the consequences related to a change in land use. Despite the growing interest in biofuels, they still face major criticism. While some biomass resources have shown a net benefit in terms of climate change reduction, the impacts on human health remain debatable. Moreover, these analyses are often controversial and criticised for being too theoretical. Additionally, aside from biomass that competes with food production (corn, sugar beet, rape), some other types of biomass can increase pressure on land availability.

This study was conducted on a willow plantation in Quebec. This willow, grown as a short rotation crop, can be used in several ways. It is assumed here that the chips are used to produce ethanol. This ethanol is then mixed with ordinary petrol to produce E85 (85% volume of ethanol) to be used in Switzerland. On first assumption, this ethanol should not cause any direct competition with human food; hence, no further analysis was performed. An A-LCA, studying the potential impacts related to the life cycle stages of this E85 product (from willow production to its use in a flex-fuel motor) was deemed sufficient. The results from this A-LCA are presented in this thesis. The data used for this analysis are primary data provided by the Quebec-based willow cultivator. These results were compared to three other products: gasoline (low-sulphur petrol), used in an unconverted motor and two other well-known biofuels, an American E85 made from corn and a Brazilian E85 from sugarcane.

It is important to note that the Quebec willow plantation was a result of a voluntary change in land use. A former market garden production was substituted by the willow cultivation, resulting in a diminished production of corn in Canada. In order to avoid any issues pertaining to the results of the first analysis (A-LCA), the processes required to compensate this reduction in corn production in Canada were added to the analysis. A system expansion was hence applied. The consequences of changing the land use were studied in the second analysis, termed C-LCA, thus this analysis remains rather incomplete as only consequences due to land use change were

considered. A complete analysis would have counted for all the consequences of using willow as a new biofuel resource.

This project has two main objectives. The first is to evaluate and to introduce the potential impacts of this new biofuel: the Quebec-based E85 made from willow, an increasingly studied biomass. The second objective is to provide a more realistic analysis by realising a C-LCA, taking into consideration the indirect land use change, and to compare these results with the A-LCA.

The project hypothesis is that the C-LCA clearly changes the results obtained for E85 made from Canadian willow cellulosic ethanol. While uncertain, this more thorough analysis avoids additional issues since the impacts of land use changes are taken into account.

The methodological choice of using a system expansion is an important issue since there is still no consensus. Two options are currently available including using an approach considering the analysis of scenarios or the use of macroeconomic models. Whereas the use of models seems less theoretical, they are nevertheless time-consuming and complex. Since this project is the first step towards a more thorough analysis, the scenarios approach was selected for this study. In his work, Schmidt (2008) analyzed the possible outcomes of a lack of wheat in Denmark using six scenarios. Likewise, the ways of compensating a lack of corn in Canada need to be analyzed. A link can be made between both studies. This methodology was hence chosen to establish the effects of changing corn cultivation by a willow one. This method appears to be an interesting approach for a C-LCA, as it considers the general ideas that underline it, namely that economy and different constraints play key roles in identifying the affected processes.

This project presents the work performed thus far in order to achieve a more exhaustive study. The innovating part remains in the fact that both approaches, A-LCA and C-LCA are studied and compared. The first results, stemming from the attributional analysis, show that willow-produced E85 could be an alternative to gasoline to reduce climate change or the consumption of non-renewable resources. However, this E85 generates more impacts on human health and on ecosystem quality. This study shows that applying a system expansion leads to a significant change in the study results. While impacts on human health were slightly higher (+ 1,5 % compared to A-LCA), they significantly decreased for ecosystem quality (- 42%). These major changes in the results lead to new conclusions: E85 now appears as a better alternative than

gasoline to preserve ecosystem quality. This method, in spite of being a simplified version of more complex interactions in crop markets, adds pragmatism to this study and validates the research hypothesis that results can markedly differ when a system expansion is applied.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VIII
TABLE DES MATIÈRES .....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XVII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XX
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	4
1.1 Les biocarburants de deuxième génération .....	4
1.1.1 La controverse.....	4
1.1.2 Les nouvelles filières.....	6
1.1.3 La production d'éthanol cellulosique.....	7
1.1.4 Le saule comme culture énergétique.....	10
1.2 L'analyse du cycle de vie .....	13
1.2.1 Historique et contexte.....	13
1.2.2 Méthodologie de l'ACV .....	13
1.2.3 Les types d'ACV .....	16
1.3 Technologies affectées et méthodes actuelles d'identification .....	19
1.3.1 Terminologie .....	19
1.3.2 Notions générales : l'approche économique de Weidema (2003).....	19
1.4 L'ACV-C et les études de biocarburants.....	21

1.4.1	L'application orientée agriculture de Schmidt (2008)	22
1.4.2	L'approche Searchinger et al. (2008)	24
1.4.3	L'approche de Kloverpris et al. (2008)	25
1.4.4	L'approche du US EPA (2009)	26
1.5	Conclusion de la revue et ouverture vers le projet	28
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE		30
2.1	L'Analyse du Cycle de Vie axée sur les attributs	30
2.1.1	Définition des objectifs et du champ de l'étude	30
2.1.2	Collecte de données	33
2.1.3	Construction de l'analyse	34
2.2	L'Analyse du Cycle de Vie axée sur les conséquences	40
2.2.1	Le choix de la méthode	40
2.2.2	Application de la méthode	41
2.2.3	Calculs de la méthode	43
2.2.4	Création d'un scénario mieux adapté à la situation canadienne	46
2.2.5	Les impacts supplémentaires modélisés	50
2.3	Analyses de sensibilité	51
CHAPITRE 3 RÉSULTATS		52
3.1	Résultats de l'ACV-A	52
3.1.1	Analyse de l'inventaire	52
3.1.2	Les résultats du saule : contribution des processus	56
3.1.3	Comparaison avec les autres systèmes de produits	57
3.2	Résultats de l'ACV-C	59
3.2.1	Quantification des scénarios de Schmidt	60

3.2.2	Résultats des calculs du scénario mieux adapté à la situation canadienne.....	60
3.2.3	Les impacts potentiels de l'ACV-C .....	61
3.3	Comparaison des résultats des deux approches.....	63
3.3.1	Résultats d'impacts des six scénarios de Schmidt .....	64
3.3.2	Résultats d'impacts du scénario mieux adapté à la situation canadienne .....	65
3.4	Résultats complémentaires.....	67
3.4.1	La consommation des véhicules flex-fuel .....	67
3.4.2	La culture du saule .....	68
3.4.3	Le carbone biogénique .....	70
3.4.4	La méthode d'évaluation des impacts : test de ReCiPe .....	72
3.4.5	L'imputation dans le processus de production d'éthanol cellulosique .....	75
3.4.6	La culture du maïs.....	76
3.4.7	La formule pour le ratio production locale / importation.....	79
3.4.8	Les hypothèses sur le transport .....	81
3.4.9	Récapitulatif des analyses de sensibilité .....	81
CHAPITRE 4	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	83
4.1	La méthode de Schmidt.....	83
4.2	Les analyses de sensibilité effectuées .....	85
4.3	ACV-A versus ACV-C.....	87
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	.....	89
RÉFÉRENCES	.....	91
ANNEXES	.....	96

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Composition du saule (adapté de Keoleian & Volk, 2005) .....	11
Tableau 1-2 : Cycle de culture du saule (adapté de Heller et al., 2003).....	12
Tableau 1-3 : Systèmes affectés et scénarios (adapté de Schmidt, 2008) .....	23
Tableau 1-4 : Ressources et modèles utilisés par le US EPA (adapté de US EPA, 2009).....	28
Tableau 1-5 : Revue des principales méthodes .....	29
Tableau 3-1 : Inventaire des flux élémentaires entrants.....	53
Tableau 3-2 : Inventaire des flux élémentaires sortants.....	54
Tableau 3-3 : Résultats des calculs des six scénarios.....	60
Tableau 3-4 : Inventaire carbone biogénique .....	71
Tableau 3-5 : Valeurs du r américain sur différentes périodes .....	81
Tableau 3-6 : Récapitulatif des analyses de sensibilité .....	82
Tableau A.I-1 : Processus cycle de vie essence .....	96
Tableau A.I-2 : Processus du système de produits E85 maïs.....	96
Tableau A.I-3 : Processus du système de produits E85 canne à sucre.....	97
Tableau A.I-4 : Cycle de vie E85 saule.....	97
Tableau A.I-5 : Processus pour l'étape de culture du saule .....	98
Tableau A.I-6 : Processus de l'étape transport du bois.....	99
Tableau A.I-7 : Processus pour l'étape de production d'éthanol 95% .....	99
Tableau A.I-8 : Processus de l'étape de transformation en éthanol 99,7% .....	99
Tableau A.I-9 : Processus de l'étape de transport jusqu'à la station service .....	100
Tableau A.I-10 : Processus de l'étape pétrole .....	100
Tableau A.I-11 : Processus de l'étape d'utilisation.....	100
Tableau A.II-1 : Récapitulatif des six scénarios de Schmidt (adapté de Schmidt, 2008) .....	101

Tableau A.III-1 : Rendements attendus des productions de maïs (adapté de Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b) .....	112
Tableau A.III-2 : Taux d'application de fertilisants (kg/ha) sur les cultures de maïs par pays (adapté de Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009) .....	114
Tableau A.III-3 : Réponse à un ajout supplémentaire de fertilisants (adapté de Schmidt, 2008).....	116
Tableau A.III-4 : Exemple d'évolution de la production de maïs aux États-Unis (adapté de Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b) .....	116
Tableau A.III-5 : Types d'augmentation de la production de maïs aux États-Unis .....	117
Tableau A.III-6 : Proportions entre augmentation par surface et par rendement de la culture du maïs aux États-Unis.....	117
Tableau A.III-7 : Proportions entre augmentation par surface et par rendement de la culture du maïs au Canada.....	117
Tableau A.III-8 : Proportions entre augmentation par surface et par rendement de la culture du maïs en Chine .....	118
Tableau A.IV-1 : Récapitulatif des processus supplémentaires pris en compte pour l'extension des frontières .....	119
Tableau A.IV-2 : Exemple d'adaptation du processus de culture de maïs .....	119
Tableau A.IV-3 : Types de terres transformés dans les pays (adapté de US EPA, 2009) .....	120
Tableau A.IV-4 : Émissions de GES (MT CO <sub>2</sub> éq / acre) sur 80 ans dues à la transformation des terres (adapté de US EPA, 2009) .....	120
Tableau A.V-1 : Variation de la production par secteur et par zone pour une augmentation de 1% de la demande en grains (gro) au Canada .....	121
Tableau A.V-2 : Variation de la production par secteur et par zone pour une augmentation de 10% de la demande en grains (gro) au Canada .....	123
Tableau A.V-3 : Variation de la production de grains (gro) pour une augmentation de 10% de la demande en grains au Canada .....	125



Tableau A.V-4 : Variation de la production de grains (gro) pour une augmentation de 10% de la demande en grains aux États-Unis.....	125
--	-----

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Les étapes de production d'éthanol cellulosique (adapté de IFP, 2008).....	10
Figure 1-2 : Les étapes de l'ACV et exemples d'applications (adapté de ISO 14040, 2006).....	14
Figure 1-3 : Structure générale de la méthode IMPACT 2002+ (adapté de Jolliet et al., 2005)....	15
Figure 2-1 : Arbre du système de produits E85 saule .....	37
Figure 2-2 : Flux de références des systèmes de produits E85 et essence .....	39
Figure 3-1 : Contribution des étapes du cycle de vie de l'E85 saule (IMPACT2002+).....	56
Figure 3-2 : Comparaison des systèmes de produits : catégorie problèmes (IMPACT 2002+).....	57
Figure 3-3 : Comparaison des systèmes de produits : score de dommages (IMPACT 2002+) .....	58
Figure 3-4 : Résultats des calculs du scénario canadien .....	61
Figure 3-5 : Résultats des sept scénarios en score de dommage (IMPACT 2002+).....	62
Figure 3-6 : Contribution des pays affectés dans la catégorie qualité des écosystèmes .....	63
Figure 3-7 : Résultats des six scénarios en score de dommages (IMPACT2002+) .....	64
Figure 3-8 : Résultats du nouveau scénario en score de dommages (IMPACT2002+) .....	65
Figure 3-9 : Résultats suite à une diminution de 20% de la consommation en E85 .....	68
Figure 3-10 : Comparaison des résultats entre données primaires et données de la littérature.....	69
Figure 3-11 : Résultats d'impacts, changement climatique, avec carbone biogénique .....	71
Figure 3-12 : Résultats comparatifs ACV-A (ReCiPe).....	73
Figure 3-13 : Résultats ACV-C Endpoint (ReCiPe) .....	74
Figure 3-14 : Nouveaux résultats ACV-A, maïs sans biorémédiation .....	77
Figure 3-15 : Nouveaux résultats ACV-C sans la biorémédiation du maïs .....	78
Figure A.VI-1 : Contribution des pays dans les résultats (ACV-C santé humaine).....	126
Figure A.VI-2 : Contribution des pays dans les résultats (ACV-C changement climatique) .....	126
Figure A.VI-3 : Contribution des pays dans les résultats (ACV-C ressources).....	127

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ACV-A	Analyse du Cycle de Vie axée sur les attributs
ACV-C	Analyse du Cycle de Vie axée sur les conséquences
AICV	Analyse de l’Inventaire du Cycle de Vie
CH <sub>4</sub>	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
E85	Mélange d’éthanol et d’essence à hauteur de 85% volumique d’éthanol
ÉICV	Évaluation des Impacts du Cycle de Vie
FAO	Food and Agriculture Organization
FAPRI	Food and Agricultural Policy Research Institute
Flex-fuel	Flexible-Fuel (véhicule à moteur modifié permettant l’utilisation d’E85)
GES	Gaz à Effet de Serre
GTAP	Global Trade Analysis Project
REET	Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation
H	Hydrogène
LUC	Land Use Change
ILUC	Indirect Land Use Change
m.s	Matière sèche
N	Azote
NH <sub>3</sub>	Ammoniac
N <sub>2</sub> O	Protoxyde d’azote

UF	Unité Fonctionnelle
US EPA	U.S Environmental Protection Agency
WTW	Well-to-Wheel

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I – Processus .....	96
ANNEXE II – Détails sur les calculs des six scénarios .....	101
ANNEXE III – Données nécessaires .....	112
ANNEXE IV – Processus supplémentaires pour les impacts de l’ACV-C .....	119
ANNEXE V – Tableaux de résultats des simulations GTAP .....	121
ANNEXE VI – Contribution des pays dans les impacts de l’extension de frontières .....	126

## INTRODUCTION

### Problématique

L'utilisation de biocarburants n'est pas un fait nouveau. Déjà au début du 20<sup>e</sup> siècle, Henry Ford croyait en l'utilisation de l'éthanol et sa Ford T fut le premier véhicule flexible-fuel. De même, lors de la création de son moteur diésel, Rudolf Diesel utilisait de l'huile de cacahuète. Seulement la découverte du pétrole comme carburant changea tout. Les biocarburants furent délaissés et ce n'est que depuis les crises pétrolières de 1973 et 1979 qu'ils regagnent l'intérêt. À l'heure actuelle, ils sont au centre de la recherche, car leur intérêt environnemental aussi bien qu'économique attire investisseurs, industries et particuliers (Biofuel, 2009).

Les recherches sur les biocarburants ne sont pas récentes et les filières dites de première génération (filières huiles, alcoool, gaz, charbon de bois) sont déjà utilisées. En Suisse, du E85 (85% volumique d'éthanol, 15% d'essence) est disponible dans environ 30 stations-service (Technique Environnement et Économie Emmen, 2008). De même des mélanges à hauteur de 5% d'éthanol dans l'essence normale (E5), qui ne requièrent pas de modification du moteur essence, sont également de plus en plus courants. La production de bioéthanol en Europe est estimée à près de 4500 Ml en 2008 (Plateforme biocarburant, 2009), toutes filières confondues. Cependant, en raison de l'espace nécessaire pour la culture des plantes utiles (maïs, betteraves) et de la concurrence alors engendrée avec l'usage alimentaire de cette biomasse, l'utilisation des biocarburants est grandement controversée. De plus les rendements de conversion de certaines biomasses en éthanol ne sont pas optimums, et les émissions de gaz à effet de serre (GES) de cette étape sont encore assez élevées. Il faut alors encourager l'utilisation de biomasses émettant moins de GES tout au long de leurs cycles de vie. Les biocarburants ne doivent engendrer aucune ou peu de concurrence avec l'alimentation, que ce soit aussi bien au niveau de la ressource elle-même qu'au niveau de l'utilisation de terres arables pour la culture de la biomasse utilisée (Tilman et al., 2009). De nouvelles filières existent, des filières dites de deuxième génération utilisant l'éthanol cellulosique ou le diesel Fischer-Tropsch. Ces filières ont l'avantage d'utiliser des ressources qui n'entrent pas directement en compétition avec l'alimentation humaine. Le bois, par exemple, est au centre de beaucoup de recherches (Demirbas, 2008). Son utilisation énergétique ne crée pas de concurrence directe avec une consommation nutritionnelle humaine puisque l'homme est incapable de digérer la cellulose.

De nouvelles sources sont présentement à l'étude, cependant il faut parvenir à déterminer si elles sont viables et environnementalement rentables pour un développement à grande échelle. Au Québec, le saule (*Salix*) commence à intéresser aussi bien les chercheurs que les agriculteurs (Labrecque & Teodorescu, 2005). Seulement, à l'heure actuelle, la seule exploitation commerciale du Québec cultive son saule sur des terres arables, remettant en cause l'intérêt des cultures énergétiques qui sont sensées éviter toute concurrence (F. Allard, communication personnelle, 14 décembre 2008). Afin de mesurer les impacts supplémentaires de cette concurrence, il apparaît alors important de prendre cet élément en compte lors d'une étude environnementale.

Ainsi, au moment même où de nombreuses recherches sont réalisées afin de développer et de perfectionner les biocarburants, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) apparaît comme une méthode clef pour appréhender les impacts environnementaux du biocarburant étudié. Ce type d'analyse permet d'évaluer les impacts sur l'environnement d'un produit, procédé ou service et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Cette analyse est donc utile pour déterminer le potentiel environnemental de ces nouveaux carburants et elle est déjà largement utilisée (Kaltschmitt et al., 1997).

Seulement une question se pose : est-ce qu'une ACV axée sur les attributs (ACV-A), prenant en compte les impacts directs des processus de production et d'utilisation du biocarburant, est suffisante pour une étude qui se voudrait réaliste ? L'ACV axée sur les conséquences (ACV-C) est de plus en plus utilisée. Dans cette étude, elle va permettre d'ajouter aux résultats de l'ACV-A les impacts supplémentaires, conséquence du changement d'utilisation de la terre, et de faire ainsi une évaluation plus complète de ce nouveau carburant.

## **Hypothèse**

L'hypothèse du projet est que le recours à l'ACV-C, prenant en compte les conséquences du changement d'utilisation de la terre, change nettement les résultats obtenus pour le E85 à base d'éthanol cellulosique de saule, et ceci même avec une approche simplifiée. Cette analyse, plus réaliste, apporte une nouvelle vision pour les études des biocarburants.

## Objectifs

Le présent projet traite du potentiel d'une nouvelle ressource : le saule au Québec. Une culture à courtes rotations de saule existe déjà au Québec. Ce projet a pour but d'évaluer quels seraient les impacts potentiels sur l'environnement si l'on destinait ce saule à une utilisation énergétique, comme source d'éthanol cellulosique. Seulement, cette culture remplace une plantation de maïs, une compétition de l'utilisation des terres est alors ressentie. Ce projet est donc centré autour de deux principaux objectifs :

- ❖ Réaliser une ACV-A afin d'évaluer les impacts potentiels, directs, sur l'environnement d'un E85 à base d'éthanol de saule cultivé au Québec.
- ❖ Réaliser une ACV-C partielle, en étendant les frontières du système de produits, afin de prendre en compte les conséquences du changement d'utilisation de la terre où est désormais cultivé le saule. Ce second objectif s'accompagne de trois sous-objectifs :
  - Choix d'une méthode d'identification des processus affectés par le changement
  - Comparaison des résultats entre les deux approches ACV-A et ACV-C
  - Évaluation des apports du recours à l'ACV-C

## Contenu du mémoire

Ce mémoire débute par une mise en contexte de cette ACV-C d'un biocarburant de deuxième génération à base de saule, réalisée par le biais d'une revue de littérature. Par la suite la méthodologie employée tout au long de ce projet est présentée. Elle est constituée de deux grandes étapes : une ACV-A de cet éthanol québécois suivie d'une extension de frontières pour parvenir à une ACV-C. Les systèmes de produits étudiés dans l'ACV-A sont ici présentés, et les calculs réalisés lors de l'extension de frontières sont expliqués. Les résultats obtenus par les deux approches sont présentés, puis comparés dans le troisième chapitre. Des résultats complémentaires, issus d'analyses de sensibilité, complètent ce chapitre. Le travail effectué tout au long de ce projet, ainsi que les choix méthodologiques seront discutés dans un dernier chapitre. Une conclusion accompagnée de recommandations clôture ce mémoire.



## CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette revue a pour but de placer le lecteur dans le contexte de l'étude. Après une revue des avancées sur les biocarburants et une présentation du saule comme ressource énergétique, la revue s'oriente vers un aspect plus méthodologique. L'Analyse du Cycle de Vie est définie puis une comparaison est faite entre l'approche axée sur les conséquences et l'approche axée sur les attributs, plus classique et mieux connue. Pour terminer, l'ACV-C est plus détaillée et les grands principes existants à l'heure actuelle sont passés en revue.

### 1.1 Les biocarburants de deuxième génération

#### 1.1.1 La controverse

Comme le souligne l'introduction, les biocarburants ont une longue histoire derrière eux. Déjà dans les années 1950 Antar (ancienne société française de pétrochimie) distribuait le "Tri-Super-Azur", un mélange de 75% d'essence, de 10% de benzol et de 15% d'éthanol anhydre (15%). Cette diffusion ne dura que 5 ans, la concurrence avec le pétrole et son faible prix ainsi que l'amélioration de la valorisation alimentaire des sucres de betteraves y mirent fin (Ballerini, 2006). C'est suite aux chocs pétroliers des années 70 que ressurgit l'intérêt oublié envers les biocarburants. La nette augmentation des prix des produits pétroliers depuis cette époque, accompagnée d'une certaine prise de conscience environnementale, a remis au goût du jour les recherches sur les biocarburants.

En effet, l'intérêt pour ces nouveaux carburants est double : une énergie renouvelable qui évite la consommation d'énergies fossiles comme carburant et qui est dotée d'un moindre potentiel polluant. Néanmoins, ce dernier point est très controversé. D'après Crutzen et al., même si l'utilisation de biocarburants entraîne une baisse des émissions de CO<sub>2</sub> il ne faut pas négliger d'autres émissions comme le N<sub>2</sub>O, classé comme GES par le protocole de Kyoto et 4<sup>e</sup> gaz à effet de serre (Crutzen et al., 2008). D'autres auteurs soulignent le fait que les biocarburants ont des avantages et des inconvénients (Petrou & Pappis, 2009). D'après eux, les principaux avantages se ressentent dans les économies d'énergies fossiles et surtout dans la diminution des émissions de GES. Une nouvelle demande pour de la biomasse pourrait relancer certains domaines d'activités ruraux et apporterait des avantages sociaux pour certaines régions. Cependant, l'utilisation

d'engrais et de fertilisants pour les cultures supplémentaires peut avoir des impacts sur la santé humaine ou sur la qualité des écosystèmes. Les biocarburants sont sources d'espoir à une époque où l'inquiétude de réserves de pétrole vides se manifeste de plus en plus. Un produit remplaçant du pétrole est donc bienvenu. Il est possible d'utiliser ces biocarburants de plusieurs façons. Une certaine quantité d'éthanol ou de biodiesel peut être injectée dans les carburants actuels en plus ou moins grande quantité. Une faible proportion de biocarburant ne nécessite pas de modification du moteur. En revanche, l'utilisation de E85 demande des moteurs adaptés. Les véhicules *flex-fuel* (ou Véhicule à Carburant Modulable) possèdent ce genre de moteurs et fonctionnent indifféremment à l'essence sans-plomb 95 (indice d'octane 95) ou à l'E85. Les biocarburants peuvent également être utilisés « purs » dans des moteurs eux aussi adaptés.

Petit à petit se sont développées des techniques de production. Pour les techniques les plus anciennes, mais non révolues, on parle de première génération. A titre d'exemple, on peut citer : les filières huile avec l'huile de colza qui peut être directement utilisée dans les moteurs diesel adaptés, les filières alcool avec l'ETBE (Ethyl-Tertio-Butyl-Ether dérivé de l'éthanol) qui peut être utilisé comme additif à hauteur de 15%, ou encore la filière Biomass-To-Liquid avec le diesel Fischer-Tropsch. Ces techniques entrent directement en concurrence avec la production alimentaire, car elles utilisent des ressources oléagineuses (colza ou le maïs) ou sucrière (telle la betterave ou la canne à sucre).

Même si le besoin de trouver d'autres options à l'utilisation des produits pétroliers d'un point de vue économique aussi bien qu'environnemental est omniprésent, la concurrence développée par l'utilisation des terres, des ressources (on parle même de stress hydrique) et d'aliments affecte l'image des biocarburants et par conséquent leur utilisation. La crise alimentaire de ces dernières années renforce cette image négative. D'après Jacques Diouf, directeur général du programme alimentaire mondial des Nations Unies, plusieurs facteurs dont la demande accrue de terres pour la production de biocarburants sont responsables des « émeutes de la faim » qui ont éclaté tout au long de l'année 2008 (Lamrani, 2008). A titre d'exemple, l'utilisation massive des champs de maïs américains à fin de production de carburant provoque une hausse des prix de la tortilla au Mexique. Cette problématique est mondiale, en Allemagne 16% des surfaces agricoles sont utilisées pour produire de la biomasse et ne sont donc plus destinées à la culture de denrées alimentaires (Techno-Sciences, 2008).

La concurrence sur l'utilisation des terres est un point souvent discuté (Petrou & Pappis, 2009). Sans progrès technologique, une exploitation à grande échelle des biocarburants semble presque impossible. Au Brésil, le deuxième pays producteur de biocarburants, près de 40% du gasoil est remplacé par de l'éthanol synthétisé à base de canne à sucre. Ce pays exploite donc largement la canne à des fins énergétiques. Aux lourdes accusations qui pèsent contre les biocarburants, le président brésilien Luis Inacio Lula da Silva répond : « *Ne me dites pas, pour l'amour de Dieu, que la nourriture est chère à cause du biodiesel* » (Le Monde, 2008). Devant de telles polémiques et de tels désaccords il semble difficile de donner du crédit à ces substituts du pétrole. Même si certaines études sur les biocarburants ont prouvé qu'il faut être méfiant vis-à-vis de leur utilisation, elles ont aussi mis en évidence la possibilité de trouver une alternative au pétrole, à condition d'avoir une bonne appréhension et compréhension de leurs impacts (Koh & Ghazoul, 2008). L'avenir des biocarburants n'est peut-être pas compromis. Une combinaison de nouvelles ressources moins polluantes et d'une bonne gestion des terres à occuper serait déjà une solution (Tilman et al., 2009). Les recherches actuelles se dirigent vers une nouvelle génération de biocarburants, la deuxième génération, qui pourrait être une solution.

### **1.1.2 Les nouvelles filières**

Ces nouveaux biocarburants utilisent de nouvelles techniques de production, mais surtout de nouvelles matières premières non consommables par l'humain. A priori, cela permettrait de diminuer les pressions, les contraintes sur les occupations de terres et toute concurrence avec les usages alimentaires. De plus, ces nouvelles ressources sont moins exigeantes en terme d'entretien, consomment moins d'engrais et d'eau et peuvent pousser sur des terres marginales. Elles peuvent aussi utiliser des nouveaux produits, des déchets de production (paille, bagasse...) qui jusqu'à présent n'étaient pas utilisés à des fins énergétiques.

Dans une revue des technologies existantes (Petrou et al., 2009), les deux filières suivantes semblent se démarquer :

- ❖ La production d'éthanol cellulosique ;
- ❖ La gazéification suivie d'un procédé Fischer-Tropsch (production d'un ersatz de diesel).

Le développement industriel à grande échelle de ces nouvelles filières est attendu entre 2012 et 2020 (Lorne, 2007).

Les développements actuels des filières, présentés dans une publication du US Department of Energy (U.S Department of energy, 2007), font que le procédé retenu pour le projet sera un procédé de production d'éthanol cellulosique. Bien que principalement sujet à des usines pilotes, cette technologie retient de plus en plus l'attention. Une usine existe déjà au Canada à l'heure actuelle et produit de l'éthanol cellulosique à base de paille (Iogen Corporation, 2008).

### **1.1.3 La production d'éthanol cellulosique**

L'éthanol est un alcool ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ). Il provient de la fermentation de sucres naturels ou encore de procédés industriels comme l'hydratation de l'éthylène (Ressources naturelles Canada, 2008). La production d'éthanol cellulosique utilise la lignocellulose des plantes. La lignocellulose est composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. C'est plus exactement la cellulose qui sera utilisée par le procédé de fabrication d'éthanol. La cellulose est un polysaccharide  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ . Dans une plante, environ 33% de sa matière est de la cellulose. Contrairement à certaines espèces animales comme les bovins, l'espèce humaine ne peut digérer la cellulose. C'est pourquoi l'utilisation de la cellulose pour une production d'éthanol n'est pas en concurrence directe avec l'alimentation humaine.

Le procédé utilisé actuellement consiste en une hydrolyse enzymatique de la cellulose suivie de la co-fermentation du glucose et des xyloses (sucres contenus dans le bois aussi appelés sucres de bouleau) en éthanol. Voici, plus en détails, les grandes étapes de production (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008) :

#### **1. Le pré-traitement**

Il sert à rendre possible l'hydrolyse en libérant la cellulose de la lignine et de sa forme cristalline. Pour ce faire, on peut utiliser des moyens physiques ou chimiques. A l'heure actuelle les techniques les plus utilisées sont : le prétraitement par ozone, l'oxydation humide par de l'alcaline et l'explosion de vapeur.

Il est important de faire attention à minimiser les produits de dégradation, car ils comportent des inhibiteurs (exemple du furfural) qui pourraient donc nuire à l'hydrolyse.

## 2. L'hydrolyse

Pour ce faire, deux méthodes peuvent être utilisées : une réaction chimique utilisant de l'acide ou une réaction enzymatique.

### ❖ L'hydrolyse chimique

Cette hydrolyse utilise soit de l'acide dilué sous haute température et pression soit de l'acide plus concentré, mais avec température et pression plus basse (pression atmosphérique). Au commencement de l'hydrolyse, c'est la mixture dé-cristallisée issue du pré-traitement qui est utilisée. Elle consiste en un mélange de cellulose, d'acide, d'eau et de sucre. Le produit de l'hydrolyse doit être ensuite neutralisé puis il peut être envoyé à la fermentation.

Ces procédés ne sont pas anodins, ainsi si l'utilisation d'acide dilué est choisie il faut savoir que l'hydrolyse est alors très difficile à réaliser et va donc dégager des produits toxiques issus de la dégradation des sucres. Il va falloir les neutraliser car ils peuvent interférer avec le processus de fermentation.

### ❖ L'hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse enzymatique est un processus similaire à celui qui se passe dans les estomacs des ruminants. Des cellulases viennent attaquer les chaînes de cellulose pour briser ces dernières en glucose. Vu les prétraitements utilisés aujourd'hui, on utilise l'hydrolyse enzymatique pour obtenir de meilleures teneurs en sucre pour la fermentation.

## 3. La fermentation

Généralement des levures sont mélangées au produit de l'hydrolyse. La réaction engendrée produit l'éthanol :



Une étape de distillation permet ensuite de séparer l'éthanol de l'eau restante.

La lignine, autre composante de la lignocellulose et donc un sous-produit, peut parfois être valorisée par une production d'énergie, par combustion (McKendry, 2002).

Une approche thermochimique (gazéification) existe également, mais est peu utilisée. Au lieu de casser les molécules en sucres, le carbone des matières premières est transformé en syngas par une gazéification. Du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de l'hydrogène (H) sont produits puis sont envoyés pour la fermentation. La fermentation utilise le *Clostridium ljungdahlii* qui convertit les différents gaz en éthanol. Comme pour l'approche par hydrolyse, la fermentation est suivie d'une distillation.

L'intérêt de l'éthanol cellulosique est qu'il est possible d'utiliser un grand nombre de matières premières. Les principales sources sont :

- ❖ Les résidus agricoles
- ❖ Le maïs
- ❖ Le panic érigé
- ❖ Le miscanthus
- ❖ Le saule
- ❖ Le peuplier
- ❖ Les résidus forestiers
- ❖ L'eucalyptus
- ❖ La canne énergétique

L'intérêt grandissant pour le panic érigé, cette plante vivace rhizomateuse, qui était autrefois très répandue aux États-Unis, réside dans le fait qu'elle s'adapte à de nombreux sols, qu'elle en permet la restauration et qu'elle a un très bon auto ensemencement. Elle peut donc prospérer sur des terres marginales, relativement arides et chaudes et sans engrais (Hipple & Duffy, 2002).

La Figure 1-1, ci-dessous, récapitule les processus de fabrication de l'éthanol cellulosique à partir de paille.

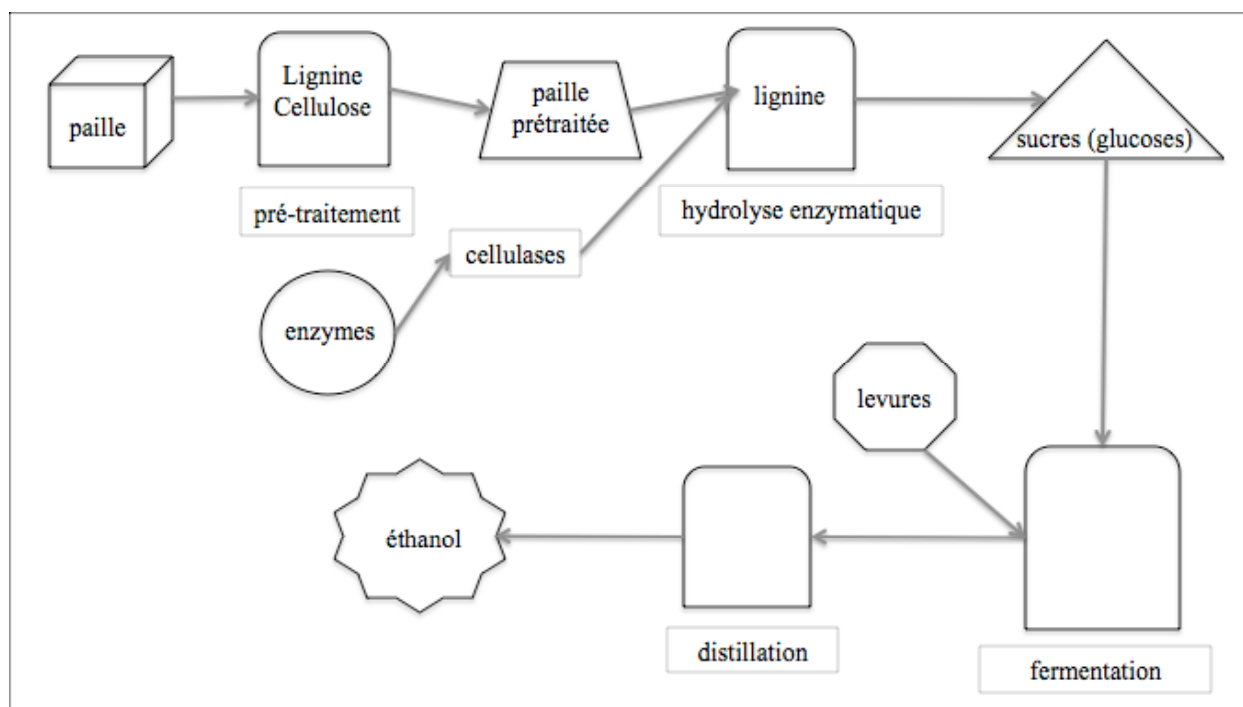


Figure 1-1: Les étapes de production d'éthanol cellulosique (adapté de IFP, 2008)

Dans une analyse « well-to-wheel » (WTW) réalisée par Zah et al. (2007), la plupart des nouvelles sources d'éthanol cellulosique (paille, bois...) semble obtenir de bien meilleurs résultats d'un point de vue changement climatique que les carburants fossiles actuels. Ces nouvelles sources semblent donc constituer une meilleure alternative au pétrole que les carburants de première génération.

#### 1.1.4 Le saule comme culture énergétique

Depuis une quinzaine d'années déjà, le saule intéresse les cultivateurs énergétiques suédois pour sa facilité d'entretien, sa croissance rapide et ses bons rendements (Johansson, 1996). De plus, pour certains auteurs, ce bois possède le meilleur rapport coût de production/ diminution de CO<sub>2</sub> émis lors de la substitution pour remplacer des sources d'énergie non renouvelables (Gustavsson et al., 1995). Qualifié de bon bois de chauffage, cette ressource naturelle regagne de popularité à l'heure où les recherches se tournent vers de nouvelles sources de carburant. Comme tout végétal, cet arbre riche en cellulose pourrait alors constituer une nouvelle source d'éthanol prometteuse. En effet, sa teneur en carbone (donc glucides) est élevée

et permet une production d'éthanol comme il est possible de l'observer dans le Tableau 1-1 ci-dessous :

Tableau 1-1 : Composition du saule (adapté de Keoleian & Volk, 2005)

<b>Composition</b>	<b>Saule (m.s %)</b>
Carbone	49,4
Soufre	0,05
Oxygène	42,9
Hydrogène	6,01
Azote	0,45
Chlore	265 ppm
Cendres	1,24

Ce type d'arbre aux nombreux bienfaits environnementaux est de plus en plus convoité. Le saule peut être exploité pour de nombreuses utilisations environnementales. Les possibilités de phytoremédiation, ses capacités de restauration écologique (stabilisation des rives de cours d'eau) tout comme ses capacités de lutte contre l'érosion due au vent où à l'eau font de lui un véritable atout écologique (Kuzovkina & Quigley, 2005).

Ces mêmes auteurs nous montrent que le saule possède de nombreuses caractéristiques qui font de lui une culture intéressante : une capacité de croissance et des rendements supérieurs à de nombreuses espèces (même pour des plants jeunes), la possibilité de culture sur des terres inondées ou saturées, sur un sol pauvre en oxygène au niveau des racines, une grande efficacité dans la prise de nutriment pouvant favoriser une dénitrification du milieu ou encore des capacités de phytoremédiation.

Plusieurs espèces sont à l'étude et les améliorations génétiques des saules sont également sujettes à de nombreuses recherches (Kopp et al., 2001; Smart & Cameron, 2008). De multiples expérimentations ont été menées au Québec pour connaître les possibilités de culture de telles espèces. L'article de Labrecque et Teodorescu (2005) relate les résultats d'expériences menées sur des cultures à courtes rotations, plantées sur des terres agricoles délaissées au sud du Québec. Testant 12 clones de *Salix*, les résultats à l'issue de 4 années de croissance se montrent encourageants quant à une culture plus étendue au Québec. Avec des rendements pouvant aller jusqu'à 65 t m.s/ha cette plante semble avantageuse (Labrecque & Teodorescu, 2005).



Cette culture énergétique se développe avec un cycle de 22 à 23 ans. La culture québécoise a un schéma de culture similaire à ce cycle (F. Allard, communication personnelle, 22 novembre 2008). A titre d'exemple, le cycle de croissance habituel est décrit dans Heller et al. (2003) et est présenté dans le Tableau 1-2 ci-dessous.

Tableau 1-2 : Cycle de culture du saule (adapté de Heller et al., 2003)

<b>Année</b>	<b>Étapes</b>
<b>0</b>	Tonte, épandage d'herbicides, labour, préparation des semences
<b>1</b>	Préparation des plants, plantations, herbicides et contrôle des mauvaises herbes
<b>2</b>	Fertilisation
<b>4</b>	1ère récolte
<b>5</b>	Fertilisation
<b>7</b>	2ème récolte et fertilisation
<b>10</b>	3ème récolte et fertilisation
<b>13</b>	4ème récolte et fertilisation
<b>16</b>	5ème récolte et fertilisation
<b>19</b>	6ème récolte et fertilisation
<b>22</b>	7ème récolte et fertilisation
<b>23</b>	Élimination des souches restantes

De plus, ces cultures peuvent utiliser des rejets d'eaux usées comme fertilisants, évitant ainsi une consommation additionnelle d'engrais (Adler et al., 2008; Labrecque & Teodorescu, 2001; Labrecque et al., 1997).

Certains résultats d'analyse de cycle de vie réalisée sur ces nouvelles cultures énergétiques, supportent l'idée que l'utilisation de cette biomasse, et ce, même en considérant l'ajout de fertilisants, serait bénéfique d'un point de vue environnemental (Heller et al., 2003). Cette ressource peut donc représenter une alternative envisageable à l'utilisation du vent ou du photovoltaïque. De plus, elle présente un net avantage puisqu'elle peut être stockée. Ses bonnes performances ainsi que ses nombreux avantages, font que cette ressource pourrait être utilisée dans une approche durable de gestion d'énergie (Keoleian & Volk, 2005).

## **1.2 L'analyse du cycle de vie**

### **1.2.1 Historique et contexte**

Suite aux préoccupations environnementales de plus en plus manifestes ces dernières années, les scientifiques aussi bien que les organismes gouvernementaux cherchent de nouveaux moyens pour évaluer les impacts environnementaux de différents produits, de procédés, de systèmes, d'habitudes de vie ou encore de services. Devenue de plus en plus populaire ces dernières années, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV, aussi appelée écobilan) est une forme d'analyse des impacts environnementaux qui considère toutes les étapes du cycle de vie d'un produit. D'après Jolliet et al. (2005), l'ACV permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et vise à prévenir les impacts liés aux activités humaines.

C'est suite aux premiers bilans énergétiques des années 70 que les méthodologies pour les ACV ont vu le jour. Des groupes de travail se sont formés, puis dans les années 1997-2000, la série de normes ISO 14040 a été mise en place afin de guider les nouvelles analyses (ISO 14040, 2006). Les ACV peuvent avoir plusieurs utilités, comme par exemple, aider à la prise de décisions aussi bien qu'à l'amélioration des performances environnementales d'un produit.

Afin de bien comprendre par la suite l'importance des travaux de recherche pour le développement d'analyses plus complètes il est important de bien saisir les notions élémentaires de l'ACV.

### **1.2.2 Méthodologie de l'ACV**

D'après les normes ISO, une ACV doit se réaliser suivant 4 grandes étapes, à savoir : la définition des objectifs et du champ de l'étude, une analyse de l'inventaire (AICV) des émissions et des extractions, l'évaluation des impacts (ÉICV) utilisant diverses méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie et, pour finir, l'interprétation des résultats (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Ces quatre étapes sont schématisées par la Figure 1-2 ci-dessous.

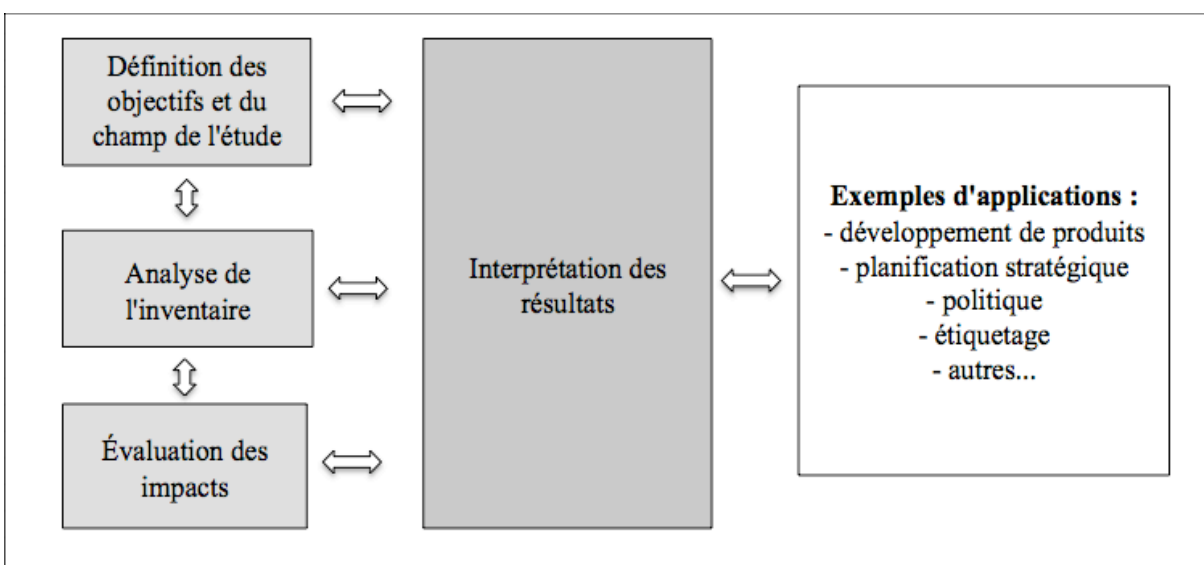


Figure 1-2 : Les étapes de l'ACV et exemples d'applications (adapté de ISO 14040, 2006)

La définition du champ de l'étude a pour étape principale la mise en évidence des fonctions du système et la définition de l'unité fonctionnelle (UF) servant de base à l'étude. Cette UF est choisie selon la fonction principale du produit à l'étude. Les frontières du système constituent la délimitation de l'étude. Seuls certains processus vont être alors étudiés. Le système de produits, ainsi que ses frontières, sont représentés par l'arbre des processus et sont définis en fonction des objectifs de l'étude.

La première valeur importante est le flux de référence. Ce flux est la quantité de produits nécessaire pour répondre aux besoins de l'unité fonctionnelle. A titre d'exemple, pour une unité fonctionnelle de x km parcourus en voiture, le flux de référence sera la quantité de carburant nécessaire pour faire avancer la voiture et une fraction de la voiture même, correspondant à la fraction de la durée de vie du véhicule nécessaire.

L'AICV permet de faire un bilan des entrants et sortants des flux élémentaires (reliant le produit avec l'environnement : matières premières, émissions). Les flux économiques (reliant deux processus) ou élémentaires seront donc mis à l'échelle du flux de référence.

Une collecte de données permet de construire les processus de l'analyse. Bien qu'il soit mieux d'avoir des données collectées sur le terrain, appelées données primaires, il n'est pas toujours possible d'en disposer. La littérature ou des données provenant de bases de données

peuvent venir compléter cette quantification des flux entrants. Ces données sont appelées données secondaires. Une base de données souvent utilisée, et qui est utilisée pour ce projet, est la base ecoinvent, qui regroupe de nombreuses données construites principalement à partir de données européennes.

Une méthode d'évaluation des impacts est nécessaire pour passer à la troisième phase de l'ACV. On en dénombre plusieurs : IMPACT 2002+, EcoIndicator 99, ReCiPe, TRACI, LUCAS etc. Le choix dépend encore une fois des objectifs et des catégories d'impacts que l'on souhaite étudier (Jolliet et al., 2005). Utilisant des valeurs moyennes européennes, une méthode souvent utilisée est IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003). Elle propose une approche combinée problèmes/dommages comprenant 14 catégories de problèmes et 4 catégories de dommages, présentées à la Figure 1-3.

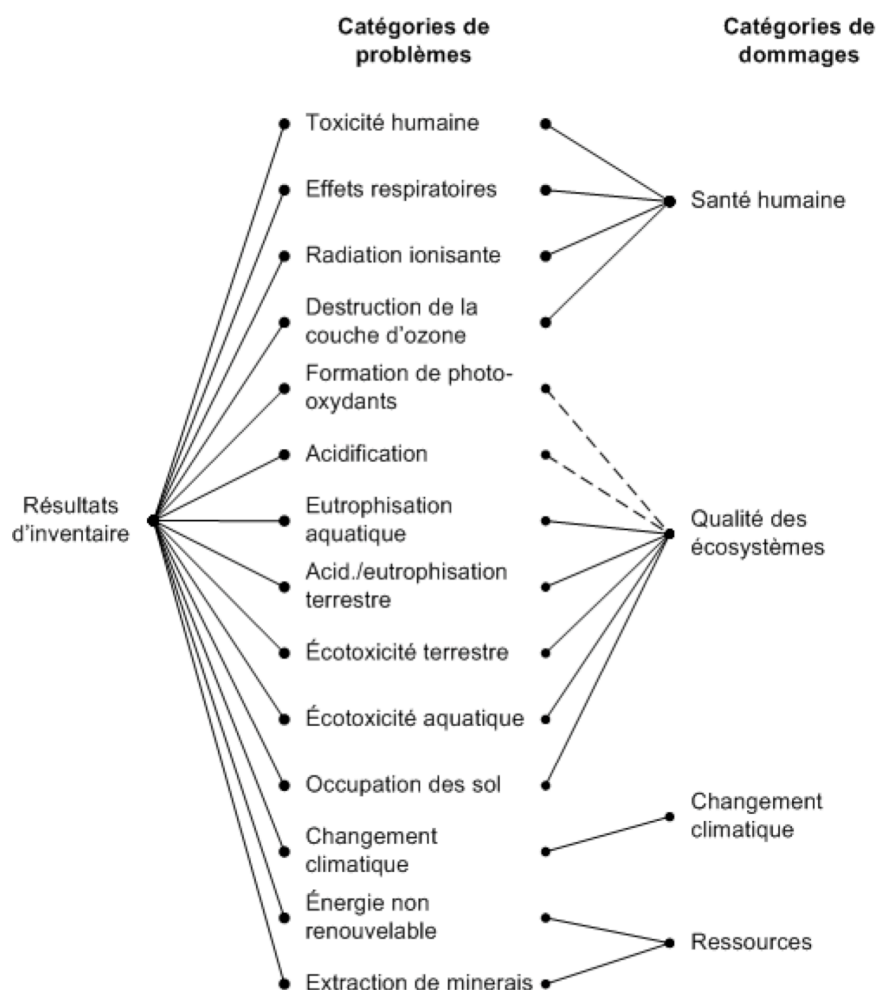


Figure 1-3 : Structure générale de la méthode IMPACT 2002+ (adapté de Jolliet et al., 2005)

Lors de la phase d'ÉICV, une étape de normalisation mettant sur une même unité les résultats des catégories de dommages peut être envisagée. La pondération consiste à attribuer un poids différent selon l'importance accordée à chaque catégorie de dommages. Les résultats peuvent être au final agrégés en un score unique. Les poids se basent sur un système de valeurs. Cependant, la normalisation et la pondération ne sont pas des étapes obligatoires d'après la norme ISO.

L'interprétation de résultats est la dernière phase obligatoire selon les normes ISO. Elle permet d'analyser les résultats, de faire les comparaisons entre les produits, et d'en tirer des conclusions. Suite à cette interprétation, des recommandations peuvent être fournies.

### 1.2.3 Les types d'ACV

Sandén et Karlstrom (2007) montrent qu'il est important de distinguer deux types d'ACV, et ce, suivant plusieurs dimensions. Le premier type consiste, d'après eux, à cartographier les impacts environnementaux dont un produit peut être tenu responsable. Pour Ekvall et Weidema (2004), ce type d'ACV sert à décrire les flux physiques environnementaux pertinents du système de produits à l'étude et qui lui sont directement reliés. Selon les auteurs, ce type d'ACV est qualifié d'axé sur les attributs (Ekvall & Weidema, 2004), (Joliet et al., 2005) qui sera le nom gardé par la suite pour cette étude, ou bien de descriptive (Guinée, 2002) ou encore rétrospective (Ekvall & Weidema, 2004) bien que ces auteurs discutent de l'utilisation de cette dénomination. Cette approche utilise des règles d'imputation pour attribuer au produit une part des impacts dans les cas de systèmes multifonctionnels. Les normes ISO ont défini une hiérarchie entre les méthodes d'imputation. Tout d'abord il faut au maximum éviter toute imputation (subdivision des processus ou extension des frontières), puis si une imputation est nécessaire il faut privilégier une imputation physique (en fonction de la masse des produits par exemple). Si l'imputation physique n'est pas applicable ou peu pertinente une imputation économique ou fonctionnelle sera possible (ISO 14040, 2006). Lors de l'ACV-C aucune règle d'imputation n'est conservée, une extension des frontières est systématiquement effectuée.

Le second type d'ACV a pour but d'analyser les conséquences d'un changement (Sandén & Karlström, 2007). Certains auteurs complètent cette définition en expliquant que ce type d'ACV permet d'analyser les impacts d'une prise de décisions (Ekvall & Weidema, 2004). Dans cette optique ce type d'ACV est qualifié d'axé sur les conséquences bien que l'on retrouve aussi

le terme prospective (Ekvall & Weidema, 2004) ou encore de change-oriented (orienté changement) (Guinée, 2002).

Le temps constituant une dimension importante dans une analyse de cycle de vie, certaines études suggèrent de laisser aux termes prospectif et rétrospectif la dimension temporelle (Weidema, 2003). Ainsi les analyses prospectives porteront sur les développements futurs tandis que les rétrospectives analyseront des impacts passés, relatifs à un historique. Pour le reste de cette étude, les termes d'ACV axée sur les **attributs** (ACV-A) et d'ACV axée sur les **conséquences** (ACV-C) sont choisis.

L'ACV-C procure des analyses plus complètes puisqu'elle prend en compte plus de processus dans le système de produits alors à l'étude. Comme il a été dit précédemment, ces analyses permettent d'évaluer les impacts d'un changement qui s'opère lors du cycle de vie. L'ACV-C permet donc d'analyser l'ensemble des impacts environnementaux d'un cycle de vie perturbé. Pour ce faire il s'agit d'identifier quels processus sont affectés par une perturbation survenue au système de produits de l'étude. On évite ainsi toute imputation massique ou physique de certains processus quand le système est multifonctionnel. D'après Weidema (2003), l'extension des frontières devrait toujours être réalisée, il prône donc un recours inévitable à l'ACV-C. Ainsi ce ne sont plus seulement les processus liés par un lien physique (massique ou énergétique) qui seront inclus dans les frontières du système de produits, mais les processus liés au produit par des liens de causalité, d'où la nécessité de construire des chaînes de cause à effet liées aux perturbations qui nous intéressent. L'ACV-C utilise donc des données qualifiées de marginales, remplaçant alors les données moyennes nécessaires pour une ACV-A.

D'après certains auteurs comme Sanden et Karlstrom (2007), il est possible de classer les conséquences étudiées, en 3 catégories :

- ❖ Les conséquences de premier ordre sont les conséquences liées aux relations entre la production, l'utilisation et la gestion des déchets. Ce sont les effets directs des flux physiques reliant les processus, ceux qui sont évalués par une ACV-A.
- ❖ Les conséquences de second ordre sont les effets plus indirects, engendrés par un changement dans la production d'un autre produit suite à une variation de sa demande, induite par une perturbation sur le cycle de vie du système de produits à l'étude. Ces effets sont souvent observés suite à une modélisation économique.

- ❖ Les conséquences de troisième ordre sont, pour finir, les effets liés au changement de technologie (souvent lié à des investissements divers) qui amènent un changement dans la disponibilité de la technologie elle-même ou des ressources (stocks) et qui altéreraient alors les préférences et donc les résultats des analyses.

Dans cette étude de biocarburant où le produit étudié est du E85 à base d'éthanol fait avec du saule, ce sont les conséquences de **second ordre** qui seront analysées.

Lors du recours à l'ACV-C, l'identification des processus affectés est une étape capitale et souvent difficile puisqu'un consensus sur la méthodologie d'identification de ces processus semble difficile à mettre en place (Tillman, 2000). Des incertitudes additionnelles peuvent donc se mêler aux ACV-C. D'après Schmidt, l'approche axée sur les conséquences se veut plus complète et réaliste, mais obtient des résultats moins précis, alors que l'approche axée sur les attributs bien que plus précise quant à ses résultats, se voudra moins réaliste à cause des nombreux *blind spots*, angles morts, occurrents dans les études (Schmidt, 2008). En effet, en ACV-A, certains processus ne sont pas pris en compte à cause de la délimitation des frontières et des imputations. Ils sont donc laissés de côté car ils ne sont pas « observés » par l'analyse, d'où le terme de *blind spot*. Ceci explique alors pourquoi l'ACV-A est qualifiée de moins complète par Schmidt.

Le choix entre l'ACV-C et l'ACV-A est au cœur de nombreuses discussions. Tout d'abord, la décision de recourir à une certaine approche doit être motivée par le but de l'étude. D'après Weidema (2003), l'ACV-C permet d'obtenir une meilleure compréhension du système de produits étudié. L'extension de frontières devrait donc être préférée à l'analyse axée sur les attributs (Weidema, 2003). L'ACV-C est largement reconnue comme utile pour l'aide à la décision (Weidema, 2003). En revanche l'ACV-C ne devrait être privilégiée que si ses résultats changent significativement par rapport aux résultats obtenus par une ACV-A (Lundie et al., 2007). De plus, il ne faut pas que les incertitudes, qui sont augmentées par le fait qu'il faut identifier des processus affectés, soient trop élevées et restreignent l'interprétation des résultats (Lundie et al., 2007). Pourtant, les résultats d'une ACV-C se veulent complémentaires, voire préférables à ceux d'une ACV-A (Andrae, 2006).

Deux grandes approches se distinguent au sein de l'ACV-C, l'approche par scénarios reconnue et utilisée par Weidema ou Schmidt (Schmidt, 2008; Schmidt & Weidema, 2008;

Weidema, 2003) ou bien l'approche des modèles macroéconomiques utilisée et prônée entre autres par Searchinger et al. (2008) et Kloverpris et al. (2008).

## **1.3 Technologies affectées et méthodes actuelles d'identification**

### **1.3.1 Terminologie**

En ACV-C, la première grande étape consiste à intégrer dans le système de produits les processus affectés (ou technologies affectées) par le changement qui a eu lieu. Certains auteurs parlent de technologies marginales, cependant Weidema préfère utiliser le terme marginal en son sens premier, pour ainsi dénommer une technologie qui ne joue pas un rôle principal dans l'étude. Ainsi, en suivant la terminologie de Weidema, le terme de technologie affectée (ou processus affecté) sera préféré (Weidema, 2003). La technologie affectée alors identifiée sera à prendre en compte dans l'élargissement des frontières du système de produits à l'étude. Les frontières sont donc modifiées pour inclure les technologies affectées par la décision et le changement apporté au système de produits. La partie du système de produits non affectée devrait être laissée en dehors de l'étude comme il a été fait par (Lesage et al., 2007). Il est possible de définir une technologie affectée par une technologie ne subissant aucune contrainte et étant alors capable de répondre à une légère variation (hausse ou baisse) de la demande (Weidema et al., 1999).

### **1.3.2 Notions générales : l'approche économique de Weidema (2003)**

Après avoir défini la notion de technologie affectée et statué sur l'utilisation de l'appellation marginale, Weidema (1999) propose une approche économique pour l'identification des processus affectés par un changement ou bien par ce qu'il est possible d'appeler une substitution de produits.

D'après Weidema, ce sont les technologies les plus ou les moins compétitives qui sont susceptibles de répondre à un bouleversement. Il s'agit alors de modéliser les variations de marché, en regardant les fluctuations des offres et des demandes. Ainsi, dans le cas où le marché affiche une tendance rapidement décroissante, les processus les moins compétitifs et qui seraient aptes à diminuer rapidement leurs volumes de production, seront affectés. Dans le cas d'un marché croissant, les processus les plus compétitifs et capables d'augmenter leur production



seront affectés. Ces modèles utilisent souvent la notion d'élasticité des prix pour évaluer les conséquences d'une variation de l'offre (augmentation de production d'un bien par exemple) sur la demande ou inversement. Si un changement dans la demande entraîne un changement équivalent de l'offre, on dit que l'offre est parfaitement élastique. Si l'offre augmente, les prix peuvent chuter entraînant alors une augmentation de la demande à son tour. Les effets sont ici linéaires. Vu l'intérêt de nouveau porté au produit les prix peuvent remonter et la demande alors rechuter, et ce, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Plusieurs auteurs utilisent ces analyses de l'offre ou la demande pour identifier les processus affectés (Lesage et al., 2007; Schmidt, 2008). Les modèles économiques sont donc souvent considérés comme élément méthodologique essentiel en ACV-C.

Dans le cas de l'analyse d'une substitution de produits (élément souvent important dans le cadre d'une analyse de cycle de vie comparative), il est important de noter que par définition une substitution d'un produit par un autre entraîne une modification dans la demande. Bien entendu, pour qu'une substitution puisse avoir lieu et soit étudiée, les produits doivent répondre à deux critères : être substituables au sens de leurs caractéristiques élémentaires et être disponibles. Il doit y avoir une prise de décision finale pour mettre en vigueur ou non la nouvelle option (Weidema, 2003).

Weidema propose une réflexion guidée par un arbre décisionnel pour parvenir à l'identification des processus affectés. Dans ce modèle il est important de noter que un ou plusieurs fournisseurs ont une production élastique (prête à répondre à une variation de prix) et que les autres producteurs ne seront pas affectés par un changement de la demande étant donnée leur production inélastique. Même une petite variation affectera le marché.

La procédure consiste en 5 grandes étapes :

1. Identifier l'étendue et l'horizon temps du changement à l'étude
2. Délimiter le marché pris en compte dans l'étude
3. Identifier la tendance de ce marché
4. Identifier les contraintes de production
5. Identifier les fournisseurs/technologies les plus sensibles au changement (technologies affectées car elles sont les plus ou moins compétitives)

En suivant ces principales étapes, Weidema illustre sa méthode par de nombreux exemples. L'exemple de la culture d'orge au Danemark va être présenté ici, vu qu'il correspond le plus au projet de recherche de ce mémoire. La délimitation géographique est l'Europe, la tendance de production est croissante (FAOSTAT). La production est contrainte, car l'ajout de fertilisants est limité législativement dans certains pays, et il n'y a pas de terres arables directement disponibles pour étendre la culture.

Une demande accrue du produit céréalière au Danemark risque en fait de déplacer une culture d'orge. L'orge est la culture qui a la marge bénéficiaire brute la plus faible. En cas d'augmentation de la demande pour une autre céréale, les cultivateurs délaisseront donc l'orge. Cette affectation va causer des ajustements dans la production d'autres céréales, notamment le maïs ou le blé. L'augmentation nécessaire dans la production de blé se fera sur une terre qui subit des rotations de culture et par ajout de fertilisants puisque c'est la solution la plus rentable.

Bien que ces idées soient généralement admises dans le domaine de l'ACV, il n'y a pas de consensus sur la méthode à utiliser pour identifier les processus affectés et les conséquences d'un changement. Cependant, l'utilisation de l'ACV-C se répand de plus en plus, surtout pour les études de biocarburants. La section suivante va traiter des principaux travaux connus dans ce domaine.

## **1.4 L'ACV-C et les études de biocarburants**

Ces dernières années, l'ACV-C, par son approche plus complète, a été employée de plus en plus pour les études de biocarburants. En effet, bien souvent, les études de biocarburants ont fixé leurs frontières aux flux directement liés au produit (approche axée sur les attributs). Or, la culture de la biomasse entraîne parfois un changement d'utilisation des terres. Ce changement, qui peut avoir des effets directs, peut aussi déplacer d'autres cultures et entraîner des effets indirects. On parle souvent d'Indirect Land Use Change (ILUC ou changement indirect d'utilisation des terres). Il y a quelque temps, presque aucune étude ne prenait en compte les changements d'utilisation des terres et leur effets indirects (Panichelli & Gnansounou, 2008). De nos jours, certains auteurs soutiennent le fait que, pour avoir des études réalistes des biocarburants, il faut prendre en compte ces changements d'utilisation des terres (Searchinger et al., 2008). Cependant un problème méthodologique existe toujours, comme pour toute ACV-C. Il faut en effet parvenir à identifier les processus affectés par ces changements. De même, il faut

être capable de modéliser les émissions dues au changement d'utilisation d'une terre. La capacité de stockage de CO<sub>2</sub> peut être perturbée (Searchinger et al., 2008). Cependant, un changement d'utilisation de terre peut également être bénéfique (Panichelli & Gnansounou, 2008). Une exploitation agricole établie sur une terre perturbée peut aider au stockage du carbone dans le sol. Comme il a été vu à la section 1.3.1, deux principales approches sont observées : l'approche de l'ACV-C par scénarios et l'utilisation de modèles analysant les variations mondiales des marchés.

Ci-dessous sont présentés certains des travaux les plus notoires qui ont été faits pour identifier ces processus affectés et faire des analyses plus exhaustives.

#### **1.4.1 L'application orientée agriculture de Schmidt (2008)**

Dans ses travaux Schmidt s'est intéressé à l'agriculture et aux variations de la demande d'un produit céréalier au Danemark. Il cherche ainsi les processus affectés par l'augmentation de la demande en blé. Son flux de référence est 1 kg de blé. Il intègre les principes généraux de l'ACV-C dans sa méthode. Ainsi, les variations de l'offre et la demande sont considérées, bien que simplifiées. Dans une situation où le marché des céréales est en croissance, les processus les plus compétitifs seront identifiés comme les processus affectés. Cette étude peut être mise directement en relation avec les analyses pour les biocarburants. En effet comme certaines sources de biomasse se cultivent sur des terres arables déplaçant des cultures, il faut alors inclure dans l'extension des frontières les processus qui vont répondre au nouveau manque engendré. Dans son étude Schmidt précise que quatre systèmes peuvent être touchés. Il propose un arbre décisionnel construit autour de dix questions, permettant d'identifier les processus et les systèmes affectés.

De cet arbre décisionnel découlent six scénarios que Schmidt propose d'analyser afin d'illustrer sa méthode. Ces six scénarios représentent les six voies de réponses possibles à une augmentation de la demande en blé au Danemark. Selon lui, ces réponses ont les caractéristiques suivantes, présentées dans le Tableau 1-3 ci-dessous.

Tableau 1-3 : Systèmes affectés et scénarios (adapté de Schmidt, 2008)

<b><u>Système</u></b>	<b><u>Description</u></b>	<b><u>Scénarios</u></b>	<b><u>Description</u></b>
1	Même région, même culture	<b>1</b>	Augmentation par surface région A
		<b>2</b>	Augmentation du rendement région A
2	Autre culture, autre région	<b>3</b>	Augmentation aux dépens d'autres cultures (Y)
3	Pas de compensation	-	Effets sociaux : faim
4	Même culture, autre région	<b>4</b>	Augmentation par importation région B et par surface
		<b>5</b>	Augmentation par importation région B et par rendement
1 et 4		<b>6</b>	Augmentation dans la région A et par importation (élasticité des prix)

Il identifie ainsi deux processus affectés pour répondre à la demande : l'augmentation de la production en augmentant la surface de culture, et l'augmentation de la production en augmentant le rendement d'une production déjà existante. Il base ses principaux calculs sur des estimations de variations de production, de surfaces cultivées et de rendements en utilisant des valeurs disponibles dans les bases de données de la FAPRI (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). En analysant ainsi plusieurs scénarios qui combinent ces processus avec des importations et du déplacement d'autres cultures, Schmidt génère un groupe de résultats. Il espère couvrir ainsi les incertitudes méthodologiques liées au choix des processus affectés. Il arrive à la conclusion que l'élargissement des frontières peut changer manifestement les résultats des émissions et de l'utilisation des terres par rapport à une approche axée sur les attributs.

Cette méthode est une vue simplifiée de ce qui pourrait se passer. Elle présente cependant l'avantage de ne pas avoir besoin d'utiliser de modèles économiques. Elle fait aussi la supposition d'être valable pour des perturbations de faibles ampleurs. Schmidt précise tout de même que les résultats sont plus réalistes avec cette approche puisque plus de processus sont inclus dans l'étude de façon à tenir compte des conséquences. Cependant, les incertitudes risquent donc d'être augmentées. En effet, beaucoup de simplifications sont faites et de nombreuses hypothèses posées. Selon lui, le choix de rester avec une ACV-A ou de recourir à une extension de frontières selon sa méthode est discutable.

Dans une autre étude, Schmidt et Weidema (2008) démontrent comment l'imputation des coproduits d'huile végétale peut être évitée par une extension de frontières. Les auteurs discutent du fait que dans de nombreuses études, l'huile végétale affectée, marginale, était l'huile de colza. De plus cette huile est identifiée comme le processus affecté pour des études analysant les produits alimentaires pour animaux. En utilisant les notions sur l'ACV-C présentées par Weidema, Schmidt démontre que l'huile affectée serait en fait l'huile de palme. Il cherche donc à étudier, en considérant une extension de frontières, le système de produits de l'huile de palme. Il cherche par la suite à analyser les conséquences du changement dans la nature de l'huile considérée. En se basant sur le contenu énergétique et protéique des coproduits, il calcule qu'un changement de 1kg de la demande en huile végétale, requiert 1,007 kg d'huile de palme et affecte 0,028 kg de farine de soya et 0,066 kg d'orge. Il conclut sur le fait que beaucoup d'études qui concernent les huiles végétales n'ont pas utilisé une approche par élargissement des frontières et devraient donc être revues.

#### **1.4.2 L'approche Searchinger et al. (2008)**

Searchinger et al. (2008) ont fait une étude cherchant à prendre en compte les terres affectées par une augmentation de 56 millions de litres de la production américaine d'éthanol de maïs d'ici 2016. D'après eux, les nombreuses études faites sur les biocarburants ont négligé la prise en compte des impacts de la transformation des terres perturbées pour répondre à la nouvelle demande. Pour estimer les changements d'utilisation de terre au niveau mondial, ils ont utilisé un modèle qui prédit l'augmentation des cultures et de la consommation de produits laitiers en considérant des données pour chaque pays.

Ce modèle est le modèle CARD ethanol analysis (Center for Agriculture and Rural Development) (Searchinger et al., 2008). Il comprend des modèles de marchés économiques à l'équilibre et se base sur les estimations de la FAPRI (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). Les données d'élasticités des prix, utiles pour voir les variations de l'offre et de la demande, ont été mises à jour. Grâce à ce modèle, Searchinger et al. identifient quatre points importants. Tout d'abord tout le maïs qui a servi pour l'éthanol ne sera pas remplacé, car une partie des coproduits a aussi une valeur nutritionnelle et va être utilisée dans le fourrage animalier qui aurait normalement utilisé du maïs. L'augmentation de la demande entraîne une augmentation des prix allant jusque 40% pour le maïs. Les exportations américaines diminuent radicalement

puisque beaucoup de terres arables sont désormais dédiées à la production de maïs pour l'éthanol. Pour finir, il est important de noter que les rendements de production du maïs bien plus faibles qu'aux États-Unis dans les pays affectés, vont provoquer une occupation des terres encore plus importante.

Les résultats de la modélisation indiquent que suite à cette augmentation conséquente de la demande en maïs pour l'éthanol aux États-Unis, 10,8 millions d'hectares supplémentaires vont être mis en culture à travers le monde. Parmi les pays touchés par cette augmentation, il y a la Chine, l'Inde et le Brésil. Après avoir identifié les pays, des estimations sont faites sur le type de terre qui sera transformé. Ces estimations se basent sur les tendances des dernières années. A cela il est supposé que la transformation de la terre émettra 25% du carbone contenu dans le sol et tout le carbone de la végétation. Ces données sont ensuite entrées dans le modèle GREET (the Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model) (Argonne National laboratory, 2007). Cet outil modélise les émissions du cycle de vie de plusieurs carburants. Les valeurs par défaut du modèle assument que l'utilisation de biocarburants diminue de 20% les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants conventionnels. Grâce à leur étude, Searchinger et al. démontrent qu'en considérant les changements indirects d'utilisation des terres, l'utilisation d'éthanol de maïs double les émissions de gaz à effet de serre pour chaque km parcouru, sur une période de trente ans. Il confirme ainsi sa principale hypothèse : qu'il faut absolument compter les effets indirects des changements d'utilisation des terres dans les analyses de biocarburants.

### **1.4.3 L'approche de Kloverpris et al. (2008)**

Dans leur travail, Kloverpris et al. (2008) parlent du manque de réalisme de certaines études qui omettent de prendre en compte les terres finalement affectées par une consommation de denrées agricoles. Ils expliquent que bien souvent, sont comptées dans l'inventaire les terres affectées dans le pays où a lieu la consommation, mais les terres d'autres pays pouvant être touchées ne sont en général pas incluses.

Le but de cette étude est d'étudier les conséquences sur l'utilisation des terres, sur le long terme, d'une augmentation de la demande pour un produit. Les conséquences sont donc étudiées suivant une approche basée sur les études de variations des marchés, référant aux grands principes de l'ACV-C. Ils analysent ainsi les tendances du marché actuel, cherchent à identifier la

composition des cultures marginales et réfléchissent sur les liens entre les progrès technologiques et les variations de la demande. Ils reconnaissent qu'il y a trois moyens d'augmenter une production de grains : le déplacement d'autres cultures, l'extension des surfaces cultivées et l'intensification de cultures existantes. Ils terminent en présentant une méthode permettant d'identifier les changements d'utilisation des terres en fonction des productions marginales. La méthodologie débouche sur l'utilisation de GTAP (Global Trade Analysis Project) (Global Trade Analysis Project, 2009). Ce modèle basé sur un équilibre général des marchés possède une large base de données couvrant jusque 87 régions et plus de 50 secteurs économiques. Les secteurs de ce modèle sont agrégés (la catégorie grain regroupe ainsi les différentes cultures) et les facteurs de production sont contraints. Les interactions entre les secteurs et les régions se basent sur des données économiques et sur des relations d'élasticités des prix. D'après Kloverpris et al., la vision globale du modèle convient parfaitement pour analyser les conséquences mondiales à long terme d'une augmentation de la demande pour une certaine culture. Afin de pallier les quelques faiblesses du modèle, il est nécessaire d'ajuster certaines valeurs (élasticités des prix...) et d'implémenter certaines relations (demande et progrès technologique, certaines données géographiques, rendre variables les surfaces de terres utilisées et idéalement ajouter un paramètre de qualité de la terre occupée). En inculquant un changement brutal de la demande à GTAP, le modèle montre que plusieurs régions vont être touchées à différentes échelles et que ceci dépend de la région d'origine de la perturbation.

Les résultats peuvent être par la suite complétés par des données statistiques agraires afin de convertir les unités en unités physiques. Ils concluent ainsi que le modèle GTAP donne une bonne indication des conséquences en termes de variation de terres utilisées. Ils en recommandent donc son utilisation.

#### **1.4.4 L'approche du US EPA (2009)**

Suite à l'acte de 2007 sur l'indépendance et la sécurité énergétique des États Unis (Energy Independence and Security Act) qui établit des valeurs seuils de réduction de GES pour les biocarburants, l'US EPA (Environnement Protection Agency) a fait des analyses détaillées sur les biocarburants (US EPA, 2009). Pour que les nouveaux carburants soient éligibles comme outil de réduction des émissions de GES, ils doivent parvenir à des réductions de 50% de GES pour les bioéthanol ou biodiesels faits à partir de biomasse et jusque 60% en moins d'émissions de GES

pour les éthanols cellulotiques. Cette étude met en évidence le lien direct qu'il y a entre le potentiel de réduction des GES des biocarburants et les émissions indirectes liées aux nouvelles cultures de biomasse et aux changements indirects d'utilisation des terres.

Afin de réaliser une étude la plus exhaustive possible, l'EPA propose une extension des frontières utilisant plusieurs types de modèles et sources de données. L'étude analyse deux scénarios : un *business-as-usual* qui considère les tendances actuelles pour les progrès technologiques et un scénario où l'utilisation de carburants renouvelables est nettement augmentée comme le requiert l'EPA.

Dans cette étude l'EPA prend en compte l'utilisation de terres en étudiant notamment l'utilisation de terres abandonnées pour la culture de la biomasse nécessaire. De plus, les effets indirects sont aussi considérés. La transformation des différents types de terres dans différents pays est analysée. Des données d'émissions de GES lors des défrichages ou déboisements sont intégrées à l'étude. Elles proviennent de calculs faits avec le modèle Winrock en suivant les directives de 2006 de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Les observations par satellites procurées par le Moderate Resolution Imaging Spectoradiameter modèle (MODIS), permettent d'évaluer les types de terres susceptibles d'être transformés et d'en calculer les proportions. Les facteurs d'émissions se basent aussi sur les changements de teneur en carbone de la biomasse et des sols. Le Forestry and Agriculture Sector Optimization Model (FASOM), estime les changements d'utilisation des terres dans le domaine de l'agriculture et de la forêt. Il possède des données sur la teneur en CO<sub>2</sub>, en méthane et en N<sub>2</sub>O des principales cultures et suit la progression de la séquestration du carbone dans la biomasse. En général l'étude montre que les effets sur les changements d'utilisation des terres directs ou indirects sont plus importants quand la biomasse convertie en biocarburant est vivrière (maïs ou soya).

Grâce à cette approche, l'EPA parvient à la conclusion que l'utilisation des biocarburants génère, en effet, beaucoup d'émissions supplémentaires à cause du changement de l'utilisation des terres. Malgré tout, les biocarburants ont tout de même un avantage sur la réduction de GES lorsqu'ils déplacent des carburants fossiles. Deux autres facteurs importants se démarquent de cette étude. Premièrement, l'horizon temps de l'étude permet ou non d'accorder de l'importance aux émissions sur le long terme. Deuxièmement, le type de terre qui est transformé (prairies, forêts) change significativement les impacts totaux. Les résultats sont tout de même mitigés. Peu



de filières atteignent réellement les seuils fixés. La filière éthanol cellulosique, avec le panic érigé et le fourrage venant du maïs, et ce, même en tenant compte des émissions indirectes, parvient à tenir les objectifs de réduction à savoir diminuer de 60% les émissions de GES en comparaison à l'utilisation de carburants fossiles. L'EPA recommande donc de prendre en considération ces facteurs dans les études pour les biocarburants. Un récapitulatif des modèles et données utilisés est présenté dans le Tableau 1-4.

Tableau 1-4 : Ressources et modèles utilisés par le US EPA (adapté de US EPA, 2009)

<u>Modèles/Ressources</u>	<u>Acronymes</u>	<u>Utilisation des données</u>
GREET	Greenhouse gases Regulated Emissions and Energy Use in Transport	Émissions cycle de vie des carburants
FASOM	Forestry and Agriculture Sector Optimization Model	Agriculture domestique
FAPRI	Farm and Agricultural Policy Research Institute	Agriculture internationale
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectoradiameter	Changement d'utilisation de terres
NREL	National Renewable Energy Laboratory	Production de carburants
USDA	United States Departement of Agriculture	Production de carburants
EIA	Energy Information Administration	Utilisation du carburant
MOVES	Motor Vehicle Emissions Simulator	Utilisation du carburant

## 1.5 Conclusion de la revue et ouverture vers le projet

Comme il a été vu dans cette revue, la prise en compte des changements indirects d'utilisation des terres lors de l'analyse d'un biocarburant semble être vivement conseillée par de nombreux auteurs (Kloverpris et al., 2008; Panichelli & Gnansounou, 2008; Schmidt, 2008; Searchinger et al., 2008). Bien que le saule et l'éthanol cellulosique atteignent des résultats favorables dans les premières analyses environnementales qui ont été faites (Keoleian & Volk, 2005; Zhi Fu et al., 2003), il semble inévitable de devoir prendre en compte les effets indirects de cette culture afin de parvenir à des résultats plus représentatifs de la réalité. Les anciennes accusations sur le manque de prise en considération de certaines conséquences seront ainsi évitées. Il semble alors intéressant de recourir à une analyse axée vers les attributs, dont la

méthodologie est mieux connue, et d'étudier par la suite une extension de frontières pour voir la pertinence ou non de recourir à un tel travail supplémentaire. D'après Mathiesen et al. (2009), le temps nécessaire pour une collecte de données supplémentaire est considérable et il n'est peut être pas pertinent de faire tout ce travail vu les incertitudes sur les résultats obtenus. Il semble alors intéressant de faire une première analyse, en conservant l'approche axée sur les attributs, qui évaluera les impacts potentiels directs du produit. Ce point constitue alors un premier objectif. Néanmoins pour suivre les recommandations fortement appuyées par d'autres auteurs, une ACV-C intégrant les conséquences du changement d'utilisation des terres, peut être envisagée pour compléter la première analyse. Les différents aspects méthodologiques seront ainsi étudiés et comparés en laissant ouverte la discussion. Le choix d'une méthode d'extension de frontières adéquate demeure néanmoins une problématique majeure. Les méthodes décrites précédemment sont récapitulées dans le Tableau 1-5. La décision finale doit alors se faire suivant des critères correspondants aux attentes de l'étude.

Tableau 1-5 : Revue des principales méthodes

<u>Auteurs</u>	<u>Année</u>	<u>Approche</u>	<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Schmidt	2008	Scénarios	Plus simple d'approche	Simplification
			Pas de modèle	
Kloverpris	2008	Modèle (GTAP)	Réaliste et complet	Difficile, demande des ressources, temps
Searchinger	2008	Modèle (CARD/GREET)		
US EPA	2009	Scenarios/modèles différents		

## **CHAPITRE 2    MÉTHODOLOGIE**

Ce chapitre présente le déroulement méthodologique de ce projet qui s'oriente autour des deux principaux objectifs du projet : la réalisation d'une ACV-A d'un E85 à base d'éthanol cellulosique de saule et d'une ACV-C qui vient compléter l'évaluation environnementale. Le choix de la méthode d'identification des processus affectés par le changement d'utilisation des terres et alors présenté et des analyses de sensibilité sont également réalisées.

### **2.1 L'Analyse du Cycle de Vie axée sur les attributs**

Dans cette première partie de l'étude, une ACV-A sur l'utilisation de E85 est réalisée selon une approche WTW. Cette approche utilisée pour les analyses de carburants, inclut dans les frontières de l'étude, toutes les étapes du « puits de pétrole » à la roue. Cela signifie, que sont prises en compte les étapes d'extraction, de transport, de raffinage, de production et d'utilisation du carburant dans le véhicule en Suisse. Cette analyse, permet une évaluation des flux directs, physiquement reliés à l'unité fonctionnelle du système de produits éthanol cellulosique. Ce carburant est composé de 85% volumique d'éthanol cellulosique synthétisé à base de saule et de 15% de pétrole. Les résultats sont interprétés et comparés à d'autres carburants afin d'apprécier les possibilités de cette nouvelle ressource. Deux autres E85, l'E85 à l'éthanol de maïs américain et le E85 à l'éthanol de canne à sucre brésilien sont étudiés. La comparaison est également faite avec un véhicule essence, dont le moteur répond à la norme EURO3. Dans ce chapitre le champ de l'étude est défini, les hypothèses sont posées, la collecte de données est présentée et l'analyse est construite.

#### **2.1.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude**

##### **2.1.1.1 Objectifs**

Cette ACV-A a plusieurs objectifs :

- ❖ Réaliser une première évaluation environnementale, des flux physiquement et directement reliés au système de produits à l'étude.
- ❖ Identifier les points chauds du système.

- ❖ Comparer les résultats avec d'autres carburants (essence, E85 maïs et E85 canne à sucre) afin de déterminer si ce nouvel éthanol semble être une alternative environnementalement intéressante pour remplacer le pétrole.

### 2.1.1.2 Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

La fonction principale du système à l'étude est d'alimenter en énergie un moteur de voiture afin de parcourir une certaine distance. L'unité fonctionnelle choisie pour l'étude est « Parcourir 1 km en voiture ».

Le flux de référence est la quantité du produit à l'étude qui est nécessaire pour répondre aux besoins de l'unité fonctionnelle. Cette étude comparera deux systèmes de moteurs différents : un moteur flex-fuel permettant l'utilisation d'E85 et un moteur essence répondant à la norme EURO3. Cette norme est la norme européenne attribuant un seuil d'émissions aux véhicules mis en service après 2000. Les flux de référence pour ces systèmes de produits sont les quantités de carburant nécessaires au fonctionnement des moteurs. Les flux incluent aussi une partie des infrastructures de la voiture et de la route, dépendamment de leurs durées de vie. Cependant dans cette étude comparative, il est supposé que cette fraction des infrastructures est la même dans les quatre systèmes de produits. Elle est donc négligée.

#### ❖ Systèmes de produits E85 :

Pour le système roulant à l'E85-éthanol cellulosique, le principal produit de cette étude, les flux de référence sont alors de 98,94g d'éthanol cellulosique et 16,3g de pétrole pour permettre le fonctionnement du moteur flex-fuel sur une distance de 1km. La voiture modèle est la Siebring. Elle consomme environ 14,5L/100km. La masse volumique de l'éthanol étant d'environ 800 kg/m<sup>3</sup> et celle du pétrole faible en soufre de 750 kg/m<sup>3</sup>, la consommation est calculée.

Il est comparé à un système E85 éthanol de canne à sucre et à un système E85 éthanol de maïs américain où les flux de référence sont les mêmes.

#### ❖ Système de produits Essence :

Pour le moteur essence, répondant à la norme EURO 3, le flux de référence est de 60,34 g de pétrole.

La consommation considérée dans ce processus de combustion d'essence est d'environ 8L/100km. Connaissant la masse volumique du pétrole faible en soufre qui est de 750 kg/m<sup>3</sup>, le flux de référence est calculé.

### 2.1.1.3 Méthodes de calculs

Une fois les flux de référence déterminés, les flux économiques nécessaires à la construction et modélisation des différents processus peuvent être calculés par mise à l'échelle.

#### ❖ Logiciel

Grâce au logiciel Sima Pro 7.1, les cycles de vie peuvent être modélisés. Ce logiciel développé par PRé Consultants, permet le calcul de l'inventaire et l'évaluation des impacts potentiels associés aux émissions inventoriées.

#### ❖ Imputation

Dans le cadre de l'ACV-A, des approches d'imputations sont employées. Celles utilisées ici seront celles présentes par défaut dans les processus de la base de données ecoinvent 2.0. Cette base de données utilise aussi bien une approche physique qu'économique. Les processus de production d'éthanol à partir de bois ou de canne à sucre sont multifonctionnels. Ils utilisent en effet un système de cogénération pour la production d'électricité dont les impacts sont imputés économiquement.

#### ❖ Méthodes d'évaluation des impacts

La méthode IMPACT 2002+ a été choisie ici comme méthode d'évaluation des impacts. Cette méthode propose des résultats orientés problèmes, avec plus de 14 indicateurs, mais permet aussi une approche dommages, rassemblant ainsi ces 14 indicateurs en 4 grandes catégories : santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources. La structure de la méthode a été présentée à la Figure 1-3. Reprenant certains facteurs de caractérisation de la méthode Ecoindicator 99, elle utilise aussi de nouvelles méthodes de calcul pour la toxicité et la santé humaine.

Cette méthode développée en 2002 est reconnue dans le monde entier dans le domaine de l'ACV. Elle a l'avantage de ne pas intégrer dans une autre catégorie de dommages la catégorie de

problèmes « Changement climatique », permettant une analyse des impacts potentiels dans cette catégorie, même en endpoint.

### **2.1.2 Collecte de données**

Afin de réaliser cette étude, il a fallu procéder à des collectes de données. Les produits servant de comparaison comme l'éthanol de canne à sucre ou bien l'essence n'ont pas bénéficié de construction particulière de processus pour ce qui a trait à la production du carburant. Les données disponibles dans la base de données ecoinvent 2.0 utilisée dans Sima Pro 7.1 ont été considérées.

La part la plus importante de cette analyse a été la construction du processus de culture du saule au Québec. Cette construction qui sera détaillée dans la section 2.1.3 a bénéficié de données d'expérimentations et de mise en culture, assurant un côté plus réaliste (données primaires). Le processus de culture est basé sur les données transmises par M. Francis Allard, cultivateur de saule dans la région de Lanaudière (cultures à courtes rotations pouvant alors servir à des fins énergétiques) (F. Allard, communication personnelle, 10 novembre 2008). Ces données ont été complétées par des données d'expériences réalisées par le Jardin Botanique de Montréal (M. Labrecque, communication personnelle, 15 janvier 2009).

La comparaison de ces données a permis de conserver des données moyennes pour le Québec, et grâce à la littérature (Heller et al., 2003; Labrecque & Teodorescu, 2005) les rendements obtenus ont été comparés, assurant une certaine validité dans les rendements de la culture québécoise qui seront alors utilisés. Les rendements du cultivateur québécois sont relativement similaires à ceux obtenus lors des expériences du Jardin Botanique ou encore à ceux disponibles dans la littérature. Ainsi un rendement de 344000 t de saule / ha au bout des 22 ans du cycle est considéré.

Les autres données nécessaires sont tirées de la base de données ecoinvent 2.0. Tout ce qui a trait à la production du pétrole ou de l'éthanol de canne à sucre ou de maïs provient de cette base de données. Les modèles de processus de production d'éthanol cellulosique ont bénéficié de données collectées par le groupe de travail Jungbluth et al. (2008) pour le projet RENEW, projet sur les biocarburants (Jungbluth et al., 2008).

### 2.1.3 Construction de l'analyse

Pour réaliser cette analyse plusieurs hypothèses ont du être posées. Tout d'abord, il est important de rappeler que le produit principal à l'étude est le E85 à base d'éthanol cellulosique de saule. Ce produit et les processus qui ont servi à le modéliser ont été en grande partie construits ou adaptés de processus existants. Les autres produits servant à la comparaison n'ont pas bénéficié de processus créés spécialement pour ce projet. Leurs cycles de vie ont été modélisés à partir de trois processus : Operation, passenger car, ethanol Br 85%/CH pour le E85 avec éthanol de canne à sucre, Operation, passenger car, petrol EURO3/CH pour le moteur à essence et Operation, passenger car, ethanol Us 85%/CH pour le E85 de maïs. Ils ont été auparavant bâtis suivant les données de consommation de la littérature (Graham et al., 2008). Ces processus ont été analysés pour 1km. La liste des processus utilisés est disponible à l'Annexe I.

#### 2.1.3.1 Suppositions

Les suppositions faites pour la réalisation de l'analyse sont les suivantes :

- ❖ La culture du saule a lieu sur une terre arable, remplaçant une ancienne culture de maïs (alternée avec du soya). La transformation de la terre arable en une forêt à courtes rotations est considérée, mais les impacts potentiels ne sont pas quantifiés. La méthode d'ÉICV IMPACT2002+, ne dispose pas de facteurs de caractérisation pour évaluer les impacts de ces transformations.
- ❖ La culture de saule est considérée comme occupant la terre en tant que forêt à courtes rotations et non comme une occupation arable.
- ❖ Bien que la culture de saule de cette étude soit bien réelle, il n'y a pas d'usine de conversion de bois en éthanol au Québec. Afin d'étudier les impacts d'un nouveau carburant qui serait produit dans cette région, nous supposons alors que la culture à courtes rotations va fournir le bois nécessaire à la conversion et que cette conversion se ferait au Québec, dans un rayon d'environ 100km.
- ❖ Le carbone biogénique, correspondant aux entrants et sortants de CO<sub>2</sub> biogénique dans le saule lors de sa croissance et sa combustion, n'est pas pris en compte dans cet inventaire. Il ne fait pas partie des flux élémentaires entrants, ni sortants lors de la combustion. Cette hypothèse suit le choix du US EPA de ne pas considérer le carbone biogénique contenu

dans le bois puisque le CO<sub>2</sub> capturé lors de la croissance de la biomasse sera le CO<sub>2</sub> relâché lors de la combustion dans le moteur (US EPA, 2009). Cette hypothèse fera l'objet d'une analyse de sensibilité à la section 3.4.3, qui présentera de nouveaux résultats prenant en compte ce carbone biogénique pour vérifier si le cycle du CO<sub>2</sub> est réellement nul lorsque les données sont analysées.

- ❖ Bien que le saule ait un fort pouvoir de phytoremédiation (Witters et al., 2009), il a été décidé de ne pas en tenir compte ici à cause des difficultés de calcul du devenir de ces métaux une fois dans le bois et la complexité méthodologique (Payet & Gambazzi, 2008). Cependant la capacité de biorémédiation du maïs, qui est prise en compte dans le processus ecoinvent *Corn, at farm /US* est considérée dans ces premiers résultats. Une analyse de sensibilité présentée à la section 3.4.6.2 reviendra sur cette hypothèse discutable. Les résultats sans la biorémédiation du maïs seront présentés.

### 2.1.3.2 Les systèmes de produits à l'étude

Quatre systèmes de produits sont ici considérés. On distingue quatre grandes étapes dans ces cycles de vie :

- ❖ Acquisition des matières premières :

Dans le cas des biocarburants, cette étape est l'étape de production de la biomasse. L'étape de culture est donc ici très importante.

- ❖ Production du carburant :

Cette étape consiste en la production d'éthanol à partir de la biomasse. Elle regroupe la production d'éthanol 95%, puis d'éthanol 99,7% ainsi que le mélange avec le pétrole. La production de l'essence, qui se trouve être du pétrole à faible teneur en soufre, sera aussi considérée.

- ❖ Utilisation :

Cette étape consiste en l'utilisation du carburant. Il s'agit donc de la combustion dans le moteur du véhicule. Bien que les différents carburants proviennent de plusieurs pays, ils seront utilisés en Suisse. Il y a donc une étape de transport jusque la station service qui comprend un mélange entre transport routier, ferroviaire et maritime au besoin. Ce choix repose sur



l'utilisation de la base de données ecoinvent qui procure des processus principalement construits à partir de données suisses et qui correspondent donc à une utilisation dans ce pays. Ce choix est néanmoins discutable puisque jusqu'en 2008 la Suisse n'importait pas de bioéthanol pour l'utilisation en tant que carburant (Confédération suisse, 2009). Cependant afin de conserver une homogénéité avec le système essence adapté à la Suisse l'hypothèse d'une importation de carburant est conservée.

❖ Fin de vie :

Comme pour tout carburant, il n'y a pas d'étape de fin de vie à prendre en compte. En effet le produit « disparaît » lors de son utilisation car il est brûlé dans le moteur.

*2.1.3.2.1 Le système de produits E85 éthanol cellulosique québécois à base de saule*

Après la collecte de données, la première étape a été la modélisation de la culture du saule au Québec. Il a été choisi de modéliser un hectare de plantation de saule, sur 22 ans soit un cycle complet d'une plantation de saule, incluant une année de préparation du terrain. 344 000 kg de saule (matière sèche) sont ainsi modélisés.

Sont donc représentées les étapes de :

- ❖ Préparation des boutures (17 000 plants nécessaires par hectare)
- ❖ Préparation du terrain (machinerie et herbicides) : première année
- ❖ Plantation (machinerie, herbicides, engrais)
- ❖ Fertilisation (machinerie, lisier). La production du lisier n'est pas considérée dans les frontières du système de produits puisqu'il s'agit de l'utilisation d'un déchet. Cependant les émissions liées à son épandage sont considérées dans l'étape de fertilisation.
- ❖ Récoltes (machinerie) : 7 récoltes sur 22 ans
- ❖ Enlèvement des souches la dernière année (machinerie)
- ❖ Production des produits chimiques et transport

Cette culture n'est pas irriguée. Le processus de culture est ensuite mis à l'échelle pour répondre aux besoins de l'unité fonctionnelle. 382,2 g de saule (m.s) sont nécessaires pour produire les 98,94 g d'éthanol 99,7% du mélange E85. Le bois est récolté tous les trois ans.

Du processus de culture suivent six autres grandes étapes :

- ❖ Transport du bois jusqu'à la distillerie : le bois est transporté sur une distance hypothétique de 10 km en tracteur puis 60 km en camion.
- ❖ Production d'éthanol 95% : ce processus utilise un rendement de 0,259 kg éthanol / kg m.s saule, rendement considéré par ecoinvent dans d'autres processus de conversion lignocellulosique. Il comprend aussi le transport de certaines matières premières par train et camion. Les processus de transport du bois ont été séparés pour constituer une étape du cycle à part entière (cf. étape précédente). L'énergie utilisée lors de la synthèse de l'éthanol, provient d'un système de cogénération, qui semble être la technologie actuellement en développement.
- ❖ Transformation en éthanol 99,7% : d'après les hypothèses posées dans ecoinvent, ce processus ne prend pas en compte un taux de perte lors de la conversion 95% vers 99,7%.
- ❖ Transport de l'éthanol jusqu'à la station service en Suisse : il faut prendre en compte une perte de 0,05%, il faut transporter 1,0005 kg d'éthanol pour en avoir 1kg disponible pour l'utilisation.
- ❖ Utilisation sous forme de E85 : ce processus prend en compte les émissions dues à la combustion du carburant, mais aussi celles de l'abrasion et de l'évaporation des pneus. Les infrastructures, c'est à dire la voiture en elle même, ne sont pas considérées.

Une étape regroupant la production du pétrole et ce qui en découle viendra compléter l'analyse du E85. La Figure 2-1 représente l'arbre du système de produits E85 québécois à base d'éthanol cellulosique de saule.

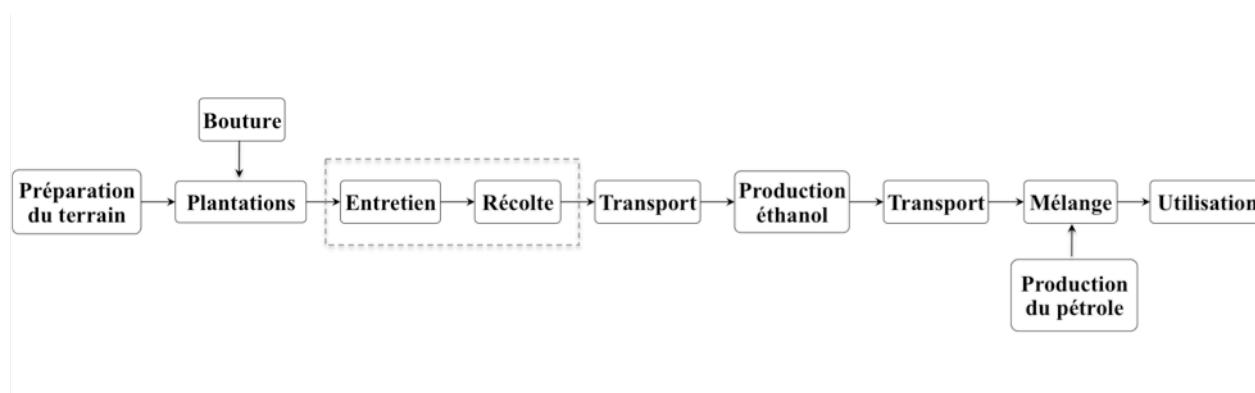


Figure 2-1 : Arbre du système de produits E85 saule

### 2.1.3.2.2 *Le système de produits pétrole*

Pour la comparaison avec le système de produits essence les processus par défaut, de la banque de données ecoinvent, ont été utilisés. Le processus utilisation (*Operation, passenger car, petrol, EURO3*) considère une quantité de 0,0603 kg de pétrole à faible teneur en soufre. La production du pétrole est elle aussi considérée et modélisée par le processus *Petrol, low-sulphur, at regional storage*. Les différentes étapes de transport, de la raffinerie au lieu de stockage, jusqu'à la station service, sont incluses dans le processus de production.

Lors de l'utilisation, seules les émissions dues à l'abrasion des pneus et de la route sont prises en compte, les infrastructures de la voiture et des routes n'étaient pas nécessaires pour la comparaison avec les autres systèmes de produits puisqu'elles sont identiques pour les quatre systèmes de produits.

### 2.1.3.2.3 *Les autres systèmes de produits E85*

Pour les deux autres systèmes fonctionnant à l'E85, les cycles de vie s'étendent de la production de la biomasse, jusqu'à l'utilisation dans la voiture flex-fuel en Suisse.

- ❖ Le maïs est produit aux Etats-Unis (*Corn, at farm /US*). L'étape de production du grain prend en compte toute la machinerie, le stockage du grain aussi bien que les entrants de fertilisants, engrais, herbicides, insecticides ou les différentes infrastructures. Le maïs passe ensuite par une étape de conversion en éthanol 95%, puis une transformation en éthanol 99,7%. Le transport de la distillerie jusqu'au lieu où se fera le mélange avec l'essence, en Suisse, est aussi compris. Il inclut 1700 km par train, 100km par camion 7000 km par bateau et pour finir 840 km par barge jusqu'en Suisse. La distribution vers l'utilisateur final, ainsi que le traitement des effluents de production sont aussi pris en compte.
- ❖ La canne à sucre est cultivée au Brésil (*Sugar cane, at farm / Br*). L'étape de production de la canne prend en compte toute la machinerie, le stockage du grain aussi bien que les entrants de fertilisants, engrais, herbicides, insecticides ou les différentes infrastructures. Elle se base sur des données moyennes brésiliennes. La canne est par la suite fermentée en éthanol 95% puis transformée en 99,7% toujours au Brésil. Le processus de production d'éthanol considère une imputation économique pour attribuer les impacts nécessaires à la

production d'électricité à partir de la bagasse. Là aussi le transport jusqu'à la station service, en Suisse est considéré. Le tanker traverse alors l'océan sur une distance de 10000km.

Des tableaux de l'annexe I, regroupent les processus ayant servi à l'ACV-A. Les systèmes de produits sont ensuite analysés et les résultats sont présentés à la section 3.1.

La Figure 2-2 résume les flux de références des systèmes de produits.

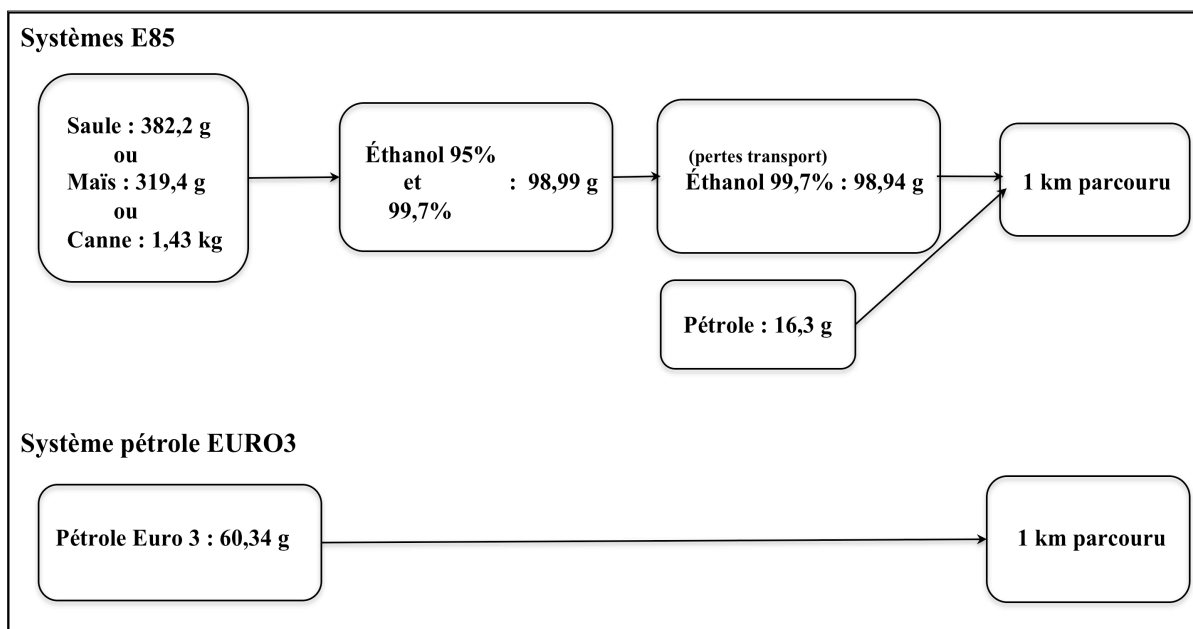


Figure 2-2 : Flux de références des systèmes de produits E85 et essence

## **2.2 L'Analyse du Cycle de Vie axée sur les conséquences**

À première vue, le saule, pouvant pousser sur des terres marginales, ne devrait pas avoir d'effets indirects. Le cas présent montre néanmoins quelles seraient les conséquences d'une conversion d'une ferme maraîchère en culture à courtes rotations.

La culture de saule déplace du maïs. En considérant la quantité d'éthanol qu'il faut pour répondre aux besoins de l'UF préalablement définie, il découle que cet éthanol a été fabriqué à partir de 382,2g de saule. Ce saule a occupé 0,65 m<sup>2</sup> de terre pendant 3 ans avant sa récolte. Cela a engendré un manque de 0,179 kg de maïs. De nombreux auteurs soulignent le fait qu'il faut prendre en considération les impacts des changements d'utilisation des terres (Kloverpris et al., 2008; Searchinger et al., 2008). Afin d'évaluer si ce changement a de réels impacts sur les résultats obtenus au préalable, il convient d'étudier les processus affectés par la diminution de l'offre en maïs alors engendrée au Canada. La principale problématique de cette étape est de trouver une méthode permettant l'élargissement des frontières et la mise en évidence de ces processus qui doivent être par la suite intégrés dans l'analyse. Cette section du mémoire présente le choix méthodologique et les calculs qui en découlent.

Suite à l'identification des processus affectés par le changement, ces processus, mis à l'échelle de l'UF, sont ajoutés à l'inventaire auparavant bâti pour l'ACV-A, afin d'avoir un inventaire aux frontières élargies, prenant en compte certaines conséquences.

### **2.2.1 Le choix de la méthode**

La réalisation de l'ACV-C ne peut se faire sans choisir une méthode pertinente pour étendre les frontières et prendre en compte les conséquences du changement d'utilisation de la terre. La méthode utilisée pour couvrir à cet objectif doit répondre à plusieurs critères :

- ❖ Prise en main rapide, pas de lourdes implémentations (une approche simplifiée d'extension des frontières est recherchée) ;
- ❖ Prise en considération des grandes idées généralement admises en ACV-C ;
- ❖ Lien faisable avec des études sur les biocarburants ;

Suite à la mise en évidence de l'importance de ces critères et à la revue de la littérature, une méthode relativement récente semble se démarquer. Il s'agit de la méthode employée par

Schmidt en 2008, qui traite des manières de compenser une demande en blé au Danemark (Schmidt, 2008).

Cette méthode, qui a été succinctement décrite dans la littérature à la section 1.4.1 peut être appliquée aux études de cas de biocarburants. En effet, Schmidt, dans son travail, traite des manières de répondre à une augmentation de la demande en blé au Danemark. Comme la culture du saule déplace du maïs au Canada, un lien peut être fait entre les deux études : il faut identifier les manières de répondre à un manque en céréale. La méthode de Schmidt semble donc s'appliquer dans ce cas-là même si, au départ, le manque provient d'une diminution de l'offre au Canada. En supposant que la demande canadienne demeure constante, il faut tout de même évaluer les façons de répondre à une demande de maïs de 0,179kg même si cette dernière n'est pas réellement une demande supplémentaire, mais juste une partie de la demande actuelle. En effet, ce maïs anciennement produit était utilisé et la diminution de l'offre fait que cette partie de la demande canadienne n'est plus comblée. Ainsi ces 0,179 kg manquants peuvent être assimilés à 0,179 kg demandés au Canada. La méthode de Schmidt est donc supposée valide dans le contexte de cette étude canadienne.

De plus Schmidt utilise les grands concepts de l'ACV-C dans son travail et sa méthode demande certes une collecte de certaines données supplémentaires mais ne requiert pas d'implémentation de modèles macro économiques, longue et coûteuse en temps et main d'œuvre.

Les trois critères étant respectés cette méthode est choisie, et servira d'outil à la réalisation de l'ACV-C partielle.

### **2.2.2 Application de la méthode**

La méthode de Schmidt va donc permettre d'étendre les frontières de l'étude et d'identifier les processus affectés par le changement d'utilisation de la terre. Ces processus sont donc la conséquence de ce changement et leur prise en compte permet de réaliser une ACV-C. Un rappel de la principale hypothèse peut être fait ici. Suite à un arbre décisionnel de dix questions détaillées, Schmidt identifie quatre systèmes qui peuvent être affectés. Il explique ainsi qu'une augmentation de la demande d'une céréale dans un pays peut entraîner une augmentation de sa production dans ce même pays ou une augmentation de sa production dans un autre pays. Cela peut également conduire au déplacement d'une autre culture, dû à la concurrence de la terre.

Il se pourrait aussi que cette demande ne soit pas compensée, engendrant alors des problèmes d'ordre social (faim, augmentation des prix...). Pour lui deux principales technologies vont être utilisées afin de répondre à la demande. Afin d'illustrer sa méthode, il propose d'analyser six scénarios qui augmentent la production de céréale, tout en considérant ces deux possibilités : une augmentation de la production en augmentant la surface cultivée ou bien en augmentant le rendement des cultures déjà existantes. Il précise aussi que ces deux technologies peuvent être exploitées dans une autre région et se combiner ainsi avec une importation de denrées. Parmi les scénarios, seuls seront envisagés des cas de compensation. Un manque non comblé de la ressource demandée ne sera donc pas étudié. Un scénario combine production locale et importation, accompagnées d'augmentation de production aussi bien par surface que par amélioration du rendement dans les deux régions concernées. Les six scénarios avaient été introduits dans les grandes lignes lors de la revue de la littérature et sont résumés dans le Tableau 1-3. Dans un premier temps, il est choisi d'analyser ces six scénarios en suivant les principes de calculs pour le Canada. L'arbre guide la décision mais les six scénarios étudiés pour le Danemark sont conservés ici puisqu'ils représentent un panel de solutions, même les solutions extrêmes, pour combler la demande en céréale. Aux premiers abords, il ne semble pas pertinent de les considérer tous. Il vaudrait mieux utiliser directement des données vraiment adaptées au Canada, mais l'étude de plusieurs scénarios, toutefois envisageables même si certains paraissent extrêmes, donne une idée de la variation des résultats suivant les moyens de compensation choisis, et informe donc sur l'amplitude des résultats attendus.

Dans cette étude la région A est le Canada, le travail consiste en cinq points importants :

1. Calculer les différentes surfaces supplémentaires nécessaires pour la nouvelle exploitation (scénarios 1, 3, 4 et 6).
2. Calculer les quantités de fertilisants à ajouter (scénarios 2, 5 et 6).
3. Identifier la région B, la région d'importation (scénarios 4, 5 et 6).
4. Identifier la culture qui est affectée au Canada en cas d'expansion des surfaces cultivées (scénario 3).
5. Calculer le ratio entre une production locale au Canada et une importation de la région B. Ce ratio se calcule suivant des valeurs d'élasticités des prix du maïs et selon une formule proposée par Schmidt.

Après avoir fait les calculs et procéder à la constitution de ces scénarios, les impacts de ces processus ajoutés au cycle de vie initial peuvent être analysés. Cependant, il faut aussi parvenir à mettre en évidence le scénario qui convient le plus à la situation actuelle au Canada et qui apportera donc le plus de réalisme possible à cette étude. En effet dépendamment de la région, certaines technologies peuvent être contraintes. L'ajout d'engrais peut être légiféré et déjà à son maximum. La région peut ne plus avoir de terres disponibles pour augmenter la surface. S'il y a une contrainte sur une technologie, elle ne peut pas être considérée comme la technologie affectée (Weidema, 2003). Suite à plusieurs observations, un scénario plus adapté à la situation canadienne est créé comme conclusion. Il est présenté à la section 2.2.4.

### **2.2.3 Calculs de la méthode**

Les processus affectés par cette diminution de l'offre de maïs de 0,179 kg ont besoin d'être quantifiés pour que leurs impacts puissent être évalués. Les suppositions principales sont tout d'abord présentées. Les calculs réalisés dans cette étude sur le maïs canadien vont être introduits par la suite, dans l'ordre des cinq points importants à identifier, présentés à la section 2.2.2.

#### **2.2.3.1 Suppositions**

La structure de cette analyse se base sur les suppositions suivantes, qui découlent pour la plupart des travaux de Schmidt :

- ❖ Pour commencer, aucune technologie ne sera contrainte, les six scénarios peuvent donc exister.
- ❖ Même une variation de faible ampleur a un effet. Cette affirmation découle des grands principes généraux de l'ACV-C (Weidema, 2003).
- ❖ La méthode est valide sur un horizon temps de court à moyen terme, c'est-à-dire moins de 10 ans.
- ❖ L'augmentation de la production par augmentation du rendement de cultures déjà existantes se fait uniquement par ajout d'engrais. Seul l'azote est considéré ici comme fertilisant.



- ❖ Lors de l'identification des autres cultures déplacées (scénario 3), seules d'autres céréales peuvent être affectées.
- ❖ Bien que les fermiers fassent des rotations de cultures (dans notre cas soya alterné avec maïs), seul le déplacement de maïs sera analysé.
- ❖ Seul le grain issu des plantations est considéré ici, la paille est exclue de l'analyse, car elle nécessiterait à elle seule une série de calculs, puisque qu'elle constitue aussi une denrée (fourrage animalier). Ainsi, comme il a été dit auparavant l'extension des frontières n'est pas totale, puisque une ACV-C en tant que telle devrait prendre entièrement en compte ce genre de conséquences.
- ❖ Le maïs est considéré être tout usage (alimentation humaine et animale).

### 2.2.3.2 Calculs

En suivant le plus possible les recommandations de Schmidt, les points suivants ont été identifiés :

- ❖ Les augmentations de surfaces cultivées :

Grâce aux données de rendements de la culture de maïs au Canada, disponibles sur le site du Food and Agricultural Policy Research Institute (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b), il est possible de calculer la surface nécessaire pour cultiver une certaine quantité de maïs dans une région. Cette base de données renferme les données de rendement ainsi que des estimations jusqu'en 2018, pour les cultures de céréales dans les principaux pays producteurs.

- ❖ Les quantités d'azote à ajouter :

En connaissant les rendements, les estimations d'augmentation de ces derniers d'ici 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b), les taux moyens d'application de fertilisants pour le maïs au Canada (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009) et la réponse de certaines céréales à un ajout supplémentaire d'azote (données de la littérature rassemblées par (Schmidt, 2008)) il est possible de calculer la quantité d'azote qu'il est nécessaire d'ajouter pour atteindre le rendement optimal espéré.

❖ La région d'importation :

La région du monde où la production de maïs augmentera le plus d'ici 2018 est susceptible de répondre à la demande canadienne. En observant les estimations de production de maïs en tonnes produites par an entre 2009 et 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b) et en calculant l'évolution de cette production il est possible de déterminer le pays d'où viendront les importations. Dans le cas du maïs il résulte que les États-Unis est le pays exportateur.

❖ La culture déplacée au besoin :

Si jamais il n'y a pas de surfaces arables disponibles et qu'il est impossible d'augmenter les rendements par ajouts de fertilisants, il se pourrait que l'expansion de la production déplace une deuxième culture (qu'il faudrait alors aussi compenser). La production de la céréale qui va être diminuée est la production la moins rentable, ainsi la terre sera conservée pour produire une céréale plus avantageuse. La marge bénéficiaire brute des céréales au Canada, c'est-à-dire la différence entre les coûts de production du grain et le prix de la vente à la ferme, doit être calculée. Pour ce faire, un rapport du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec a été utilisé (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2005). Il rassemble des données québécoises sur les coûts de production des grandes cultures ainsi que les prix de vente à la ferme. Ces données datent de 2005 et ont été extrapolées pour ce projet à l'échelle du Canada. L'orge est la céréale ayant un fort risque d'être affectée au Canada. Il reste cependant à identifier le pays qui viendra combler ce manque en orge. Dans des travaux précédent Weidema et al. (2003) ont identifié le Canada comme le pays qui peut répondre à une augmentation de la demande en orge. L'orge pousse extensivement et sans contrainte particulière dans des prairies au Canada (R. Phillips, communication personnelle, 10 août 2009). Ces prairies se verraient transformées en terre disponible pour des cultures au besoin. Ainsi, une partie des prairies se verraient transformées pour le maïs, mais si un besoin pour l'orge se faisait aussi sentir, la culture dans ces prairies serait développée (plus d'orge plantée dans les prairies du Canada).

❖ Le ratio entre une augmentation de production locale et les importations :

Schmidt propose un scénario combinant une production locale et des importations. De plus les technologies affectées sont aussi associées et les proportions d'une augmentation par

surface et d'une augmentation par rendement, dans chaque pays sont évaluées. Schmidt suggère que ce ratio peut être calculé considérant l'élasticité des prix sur l'offre et la demande de la céréale concernée. Considérant les valeurs disponibles dans les bases de données de la FAPRI (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009a) le ratio se calcule suivant la formule :

$$\Delta S = \Delta D * \eta S / \eta D \quad (4.1)$$

où  $\Delta D$  est la demande en maïs,  $\eta S$  et  $\eta D$  les valeurs d'élasticités des prix sur l'offre et la demande respectivement. Comme ces valeurs dépendent de la fonction du grain, des valeurs moyennes entre maïs pour l'alimentation humaine et maïs pour l'alimentation animale ont été calculées puis conservées.  $\Delta S$  représente la portion de la quantité demandée qui est alors produite au Canada. Le reste sera donc importé des États-Unis.

Un deuxième calcul important permet d'obtenir la proportion entre augmentation par surface et augmentation par rendement. Grâce aux données sur les estimations de production de 2009 à 2018, sur les estimations d'évolution du rendement et des surfaces cultivées pour la culture du maïs au Canada et aux États-Unis, il est possible de calculer quelle est la proportion de cette évolution de la production qui va se faire par l'augmentation de la surface cultivée ou du rendement (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). Ces proportions sont déterminées pour les deux pays.

Les différents calculs réalisés pour chaque scénario sont expliqués à l'Annexe II. Suite à ces premiers calculs et une collecte d'informations provenant de diverses sources, un autre scénario est créé. Il s'agit d'un scénario mieux adapté à la situation canadienne.

## **2.2.4 Création d'un scénario mieux adapté à la situation canadienne**

Comme il a été dit auparavant, un scénario supplémentaire est créé comme résultat de plusieurs observations. Ci-dessous vont être présentés les suppositions, les autres tests et calculs faits pour parvenir à la construction de ce scénario.

### **❖ Les recommandations de Schmidt :**

Suite à son travail, Schmidt met déjà en évidence la problématique du choix du scénario le plus adapté à la situation donnée et apportant le plus de réalisme. Bien que ses six scénarios représentent à la base un éventail de solutions envisageables pour répondre à cette baisse d'offre

du maïs au Canada, Schmidt recommande les scénarios où une autre culture sera déplacée (scénario 3) ou alors une combinaison entre augmentation locale et importation (scénario 6). Ainsi considérer les scénarios 3 et 6, pour des pays comme le Danemark ou le Canada où beaucoup de contraintes (surfaces disponibles, législations sur les engrais...) existent, est conseillé. Suite à cette affirmation, le nouveau scénario considère une répartition entre production locale au Canada et importation des États-Unis.

❖ La disponibilité de terres supplémentaires :

Des communications personnelles avec l'association des cultivateurs de maïs du Manitoba (Manitoba Corn Growers Association) et le département de l'Agriculture des États-Unis (U.S Department of Agriculture) ont confirmé le fait qu'au Canada et aux États-Unis il n'y a plus vraiment de surfaces arables disponibles. De plus, aucune déforestation ne sera faite pour faire pousser du maïs supplémentaire (T. Bergsma, communication personnelle, 17 août 2009, S. Crutchfield, communication personnelle, 13 août 2009). Une forte demande pour un certain produit engendrera alors un déplacement d'une autre culture afin d'utiliser la terre de manière plus rentable. Ces informations confirment la théorie de Schmidt disant que dans la plupart des cas où une augmentation de la production d'une céréale se fait par une augmentation de la surface de culture elle déplace une culture moins intéressante financièrement. Ainsi, toute augmentation de production se faisant en augmentant la surface cultivée sera aux dépens d'une autre culture.

❖ Une boucle de calculs pour les États-Unis :

Afin d'analyser comment les États-Unis répondent à la demande engendrée par la quantité de maïs qu'ils devront exporter au Canada. Une deuxième boucle de calcul, testant de nouveau six scénarios a été faite. Le principal intérêt de cette deuxième boucle réside dans le fait que la Chine est identifiée comme le pays affecté pour des importations de maïs aux États-Unis. De plus, d'après les calculs, l'avoine serait la culture affectée par une concurrence sur l'utilisation de la terre (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b; National Agricultural Statistics Service USDA, 2009). Cependant le manque de données sur la culture de l'avoine, conduit à poser l'hypothèse que les États-Unis augmenteraient au besoin cette culture en y ajoutant des fertilisants sur des cultures déjà existantes. Une autre supposition est posée pour cette seconde boucle : en Chine l'augmentation de la production de maïs, reliée à une augmentation de la surface, se fera par transformation de terres de différentes natures en terres arables pour le maïs

(US EPA, 2009). Cette supposition est appuyée par l'hypothèse que de la culture chinoise contribue pour peu dans les résultats d'impacts finaux. Ainsi une troisième boucle de calcul n'est pas non plus nécessaire, puisqu'elle engendrerait peu de changement dans les résultats finaux.

❖ Le ratio entre la production locale aux États-Unis et les importations de Chine :

Comme pour le scénario 6 de Schmidt, et pour la première boucle Canada/États-Unis, il faut déterminer la répartition entre une augmentation américaine et des importations de Chine. Comme pour le premier calcul, la formule proposée par Schmidt, et expliquée à la section 2.2.3.2, pourrait être employée. Cependant, les valeurs d'élasticités des prix pour le maïs aux États-Unis ne sont pas disponibles dans les bases de données de la FAPRI. La difficulté pour obtenir des estimations ou de faire ce genre de calculs pour les États-Unis, à cause de la non linéarité des modèles représentant le marché du maïs aux États-Unis, a été confirmée par des communications personnelles avec les responsables de la FAPRI Missouri (P. Westhoff, communication personnelle, 23 septembre 2009). La formule de Schmidt est alors adaptée pour que ce ratio puisse tout de même être calculé avec les données alors disponibles. Reprenant les définitions d'origine sur les notions d'élasticités des prix le ratio est approximé. L'élasticité des prix sur la demande correspond au rapport entre la variation relative de la demande par rapport à la variation relative du prix sur une période fixée. L'élasticité des prix sur l'offre est une approche similaire, mais concerne la variation relative de l'offre.

La précédente formule de Schmidt est estimée par :

$$r = \Delta S \text{ USA (2008-2007)} / \Delta D \text{ USA (2008-2007)} \quad (4.2)$$

où  $\Delta S$  représente la variation de l'offre en maïs aux États-Unis entre 2007 et 2008 et  $\Delta D$  la variation de la demande. Cette formule s'appuie sur l'hypothèse de marchés parfaits et d'élasticité de l'offre et la demande. En vérifiant ici comment l'offre varie entre deux années et si elle répond à la variation de la demande, on en déduit si l'offre américaine peut répondre entièrement ou non à la demande. Si ce ratio  $r$  est inférieur à 1, la variation de l'offre ne complète pas la variation de la demande. Ainsi, il est supposé qu'il devient nécessaire de combler cette différence, pour assurer une certaine stabilité dans les quantités de maïs disponibles et les stocks. Il faut donc importer. Étant donné que dans ce scénario, la demande augmente aux États-Unis puisque ce pays doit répondre aux attentes canadiennes, la réponse de l'offre vis-à-vis de cette

augmentation de la demande est donc estimée approximativement. L'étude se situant en 2009, la tendance observée entre 2008 et 2007 est étudiée. Ce  $r$  sera alors le ratio entre une production américaine et les importations. La variation du prix du maïs aux États-Unis entre 2007 et 2008, se retrouve simplifiée dans la formule ci-dessus. La variation de l'offre peut être calculée grâce aux données disponibles sur l'offre en maïs des années 2007 et 2008 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). La variation de la demande, quant à elle, représente la différence entre l'offre et les stocks finaux de chaque année. Ces données sont également disponibles dans les banques de données de la FAPRI (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b).

❖ Confirmation des tendances avec un modèle macro-économique :

Afin de confirmer les tendances observées, à savoir que la réponse à une augmentation de la demande dans une région A se ferait plutôt par une combinaison de productions locales et d'importations, une simulation est réalisée avec le modèle GTAP (Global Trade Analysis Project, 2009). Ce modèle permet d'étudier la réponse mondiale suite à une perturbation de la demande pour un produit dans une certaine région. Il est important de préciser que cette simulation est simplifiée, les paramètres macro économiques (PIB, population des pays...), qui doivent normalement être ajustés suite à une analyse précise des tendances actuelles, ont été fixés aux valeurs alors disponibles dans ce modèle datant de 2004. Les résultats se basent donc sur des estimations. Ainsi, deux simulations ont été faites. La première résulte d'une perturbation (à la hausse) de la demande en grain au Canada. Les résultats montrent alors que le Canada lui-même verrait sa production en grain augmentée et qu'il serait suivi par une augmentation de la production américaine. La deuxième simulation a étudié la réponse d'une augmentation de la demande en grain aux États-Unis. Là encore le premier pays touché serait les États-Unis, répondant par une augmentation de la production de grain, suivi par l'Asie, qui elle aussi augmenterait sa production de grain. Malheureusement, les données étant agrégées dans GTAP, seule une perturbation sur le produit « grain » peut être effectuée et non sur le maïs seulement. Il découle tout de même de cette simulation, que les premières suppositions se voient confirmées. Les résultats chiffrés de ces deux simulations sont présentés dans un tableau disponible à l'Annexe V.

Les résultats des calculs ainsi que les résultats des nouveaux impacts de ce scénario sont présentés aux sections 3.2.2 et 3.2.3.

### 2.2.5 Les impacts supplémentaires modélisés

La prise en compte de ces nouveaux processus change les impacts qu'il est nécessaire d'analyser. En plus des impacts directement liés à la fabrication de l'éthanol de saule et à son utilisation, c'est-à-dire les impacts étudiés lors de l'ACV-A, les impacts suivants doivent être pris en compte :

❖ La culture du maïs :

En effet, il est nécessaire de prendre en compte la culture de maïs déplacée par le saule, ainsi que les cultures additionnelles. Le processus élémentaire initial est américain (Corn, at farm /US). Il a été adapté pour la Chine et le Canada en fonction des différences de rendement. L'occupation des terres arables est aussi mise à part pour suivre cette adaptation.

❖ Le transport supplémentaire :

Pour les cas de la production canadienne, le transport supplémentaire est négligé. En effet, nous supposons qu'il est difficile d'évaluer une différence de distance entre la première culture de maïs qui est déplacée par le saule et la nouvelle culture. En revanche, dans le cas des importations, un transport par train est considéré aux États-Unis sur une distance de 1000km. Pour les importations de Chine qui viennent combler un manque américain, le maïs voyagera tout d'abord par bateau de Hong-Kong à New York puis un peu par train à l'intérieur même des États-Unis.

❖ L'ajout d'azote :

Pour les scénarios où la production est ajustée en augmentant le rendement par ajout d'engrais, il faut alors évaluer et prendre en compte l'azote ajouté, les nouvelles émissions et l'épandage lui-même. Dans cette étude l'urée est assimilée à de l'azote (*Urea, as N, at plant /RER*). Un processus représentant la fertilisation d'un champ (machinerie, diesel, énergie) sur la surface voulue, est aussi considéré pour l'application.

❖ L'occupation et la transformation des terres :

Le changement d'occupation des terres tient un rôle important dans cette étude. Tout d'abord, la terre où est cultivé le saule change d'une occupation arable à une occupation en tant que forêt à courtes rotations. De plus, de nouvelles surfaces vont être occupées et d'autres

transformées notamment en Chine. La méthode d'évaluation des impacts IMPACT 2002+ ne procure pas de facteurs de caractérisation pour la transformation des terres. Afin de tout de même prendre en compte les impacts sur le changement climatique d'un changement d'utilisation de la terre, les données de l'US EPA ont été utilisées. Le tableau à l'Annexe IV récapitule ces valeurs. Dans ce tableau, des valeurs d'émissions de GES, en kg CO<sub>2</sub> équivalent par acre, en fonction du type de terre transformé, du pays et de la nouvelle fonction de la terre sont disponibles. Suite à la quantification des scénarios, les surfaces de terres qu'il est nécessaire de transformer sont connues. Le type de terre qui va être transformé ainsi que la nouvelle fonction (arable dans le cas de la culture du maïs par exemple) sont également connus. La quantité de GES émise par la transformation de la terre peut donc être déterminée.

## **2.3 Analyses de sensibilité**

Afin de vérifier certaines hypothèses, des analyses de sensibilité sont effectuées. Une autre méthode d'évaluation des impacts ReCiPe (Goedkoop et al., 2009), est entre autres testée afin d'évaluer les incertitudes face au choix des facteurs de caractérisation. Des analyses sont aussi faites sur certaines hypothèses, notamment le transport ou encore la considération du carbone biogénique et de la biorémediation du maïs tout au long de l'analyse. Ces deux points avaient été négligés dans un premier temps, il semble important de vérifier la validité de telles hypothèses simplificatrices. De même cette étude ayant pu bénéficier de données primaires pour la modélisation de la culture du saule québécois, ces résultats seront comparés avec des données secondaires, disponibles grâce au travail de l'équipe Jungbluth et al. (2008). Ces données permettront d'étudier les effets de la phytoremédiation, qui est prise en compte dans cette modélisation. Les résultats de ces analyses sont présentés à la section 3.4.



## CHAPITRE 3 RÉSULTATS

Dans ce chapitre sont présentés les différents résultats obtenus tout au long de ce projet. Tout d'abord, les résultats de l'ACV-A sont introduits. Ils comprennent une analyse de l'inventaire, l'évaluation de la contribution des étapes du cycle de vie du E85 saule et une comparaison des résultats d'impacts des quatre systèmes de produits analysés. S'en suivent les résultats de l'ACV-C avec, pour commencer, les résultats des calculs et la quantification des scénarios puis l'évaluation des impacts. Les résultats ACV-A/ACV-C sont ensuite comparés. Les résultats complémentaires, provenant entre autres d'analyses de sensibilité, terminent ce chapitre.

### 3.1 Résultats de l'ACV-A

#### 3.1.1 Analyse de l'inventaire

Une première étape dans la comparaison des résultats est d'observer le résultat d'inventaire. C'est-à-dire, relever les flux élémentaires entrants (matière première, énergie brute) qui sont classés dans la catégorie des *raw materials* (matériaux bruts) et les flux sortants (les émissions) qui se font dans les trois compartiments air, sol et eau.

Tout d'abord sont présentés les flux élémentaires entrants. Les flux présentés dans le Tableau 3-1 sont les flux dont l'observation a la plus grande pertinence vu l'orientation de cette étude. Ces flux font partie de ceux qui ont également la plus grande contribution massique ou bien sont potentiellement plus polluants (analyse des facteurs de caractérisation). Il est cependant important de rappeler que, pour le système de produits saule, le dioxyde de carbone biogénique entrant ou sortant du saule n'a pas été considéré (hypothèse confortée par les travaux du US EPA (US EPA, 2009)). De plus, la capacité de phyto-rémédiation du saule est omise suite à de trop nombreuses incertitudes sur le devenir des contaminants. Ainsi les résultats sur le carbone biogénique ne sont pas discutés ici, mais lors de l'analyse de sensibilité à la section 3.4.3.

Tableau 3-1 : Inventaire des flux élémentaires entrants

	Unité	E85 Saule	E85 Maïs	E85 Canne	EURO 3
Pétrole, brut	g	30	42,3	26,1	69,1
<b>Occupation</b>					
Arable	m <sup>2</sup> a	-	0,2	-	-
Arable, non irriguée	m <sup>2</sup> a	0,004	0,03	0,2	1,4.10 <sup>-6</sup>
Forêt, courtes rotations	m <sup>2</sup> a	0,25	10 <sup>-5</sup>	5,4.10 <sup>-6</sup>	9,6.10 <sup>-7</sup>
<b>Transformation</b>					
<b>À partir de</b>					
Arable	dm <sup>2</sup>	1,11	34,3	2,7.10 <sup>-6</sup>	7,1.10 <sup>-7</sup>
Arable non irriguée	dm <sup>2</sup>	0,72	3,9	21,3	2,5.10 <sup>-4</sup>
Forêt	mm <sup>2</sup>	54,1	69,9	40,2	73,5
Prairie	cm <sup>2</sup>	0,16	66,7	0,045	0,0018
Arbustes	cm <sup>2</sup>	0,01	0,014	20,9	9,7.10 <sup>-4</sup>
<b>Vers</b>					
Arable	dm <sup>2</sup>	7.10 <sup>-5</sup>	34,3	3.10 <sup>-5</sup>	1,5.10 <sup>-5</sup>
Arable non irriguée	dm <sup>2</sup>	0,7	4,6	21,5	2,5.10 <sup>-4</sup>
Forêt, courtes rotations	cm <sup>2</sup>	111	3,6.10 <sup>-3</sup>	1,9.10 <sup>-3</sup>	3,4.10 <sup>-3</sup>
<b>Utilisation</b>					
Bois (divers)	cm <sup>3</sup>	1	1,5	0,7	0,2
Eau (divers)	cm <sup>3</sup>	1678,6	2931,9	2158,2	362,2

L'analyse des flux entrants permet de comprendre les processus d'occupation et de repérer quels types de terres sont transformés. L'utilisation de ressources comme le bois ou l'eau a également de l'importance. Il apparaît que l'E85 québécois à partir de saule utilise beaucoup d'eau et de bois. En effet, le processus de conversion du bois en éthanol requiert une importante quantité d'eau. La conversion en elle-même utilise de l'eau provenant de rivières (par le biais d'eau du robinet). La production des produits chimiques utilisés lors de la synthèse d'éthanol est aussi une forte utilisatrice d'eau (notamment l'acide sulfurique). Il en est de même pour la production d'éthanol à partir de la canne. En revanche pour le maïs, la forte irrigation des cultures est la principale responsable de cette forte utilisation en eau. Cependant, il semble que le processus de culture des trois biomasses ainsi que la cogénération fournissant l'énergie lors de la production de l'éthanol soient responsables de la demande en bois. Le diesel utilisée dans la machinerie utilise du bois. En analysant ce processus, une fraction de hangar nécessitant du bois est, en fait, considérée.

L'inventaire permet aussi de quantifier les flux élémentaires sortants (émissions). Et ce, dans les trois compartiments air, eau et sol. Ces flux sont présentés dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Inventaire des flux élémentaires sortants

	Unité	E85 Saule	E85 Maïs	E85 Canne	EURO 3
<b>Air</b>					
CO fossile	g	0,18	0,23	0,14	1,04
CO <sub>2</sub> fossile	g	105,7	188,2	79,5	232,2
N <sub>2</sub> O	mg	88,7	229,8	25,7	3,3
SO <sub>2</sub>	mg	305	477	287	289
NO	mg	427	643	521	206
NH <sub>3</sub>	mg	553,2	386	126,6	26,7
<b>Particules</b>					
< 2,5 µm	mg	44	51,1	146	21,2
> 10 µm	g	0,11	0,13	4,4	0,09
> 2,5 µm et < 10 µm	mg	29,9	44,1	27,8	18,4
<b>Hydrocarbures</b>					
Aliphatiques, alcanes cycliques	µg	0,2	1,2	0,2	0,08
Aliphatiques, alcanes	mg	6,7	5,4	6,9	16,4
Aliphatiques, insaturés	mg	6,7	0,9	8,3	3
Aromatiques	mg	0,9	1,3	0,9	3
Chlorés	mg	4,8	5,5	2,3	0,3
Dioxines	pg	85,5	46,1	102,8	7
Arsenic	µg	10,8	15,9	9,4	3
Benzo-a-pyrène	µg	1,4	0,6	1,6	0,1
Cadmium	µg	8,7	9,6	6,3	5,4
<b>Eau</b>					
Arsenic, ion	µg	25,9	182,1	69,6	10,4
Cadmium, ion	µg	15,7	66,7	40,4	4,6
Cuivre, ion	µg	274,8	270,5	327,6	85,1
Mercure	µg	0,67	9,3	4,7	0,3
Nitrates	g	0,16	8,6	0,03	5,7.10 <sup>-4</sup>
<b>Hydrocarbures</b>					
Aliphatiques, alcanes	µg	237,3	317,7	195,1	514,3
Aliphatiques, insaturés	µg	21,9	29,3	18	47,5
Aromatiques	mg	0,98	1,3	0,8	2,1
Non spécifiées	µg	161,3	227	111	261,5
<b>Sol</b>					
Aldrine	mg	3,7.10 <sup>-7</sup>	7,4.10 <sup>-7</sup>	50,8	5.10 <sup>-8</sup>
Arsenic	mg	0,002	0,0005	3,6	0,0007
Cuivre	µg	100,8	-418,9	105,4	46,2
Glyphosate	mg	2,9	6,9	4,7	0,0008
Mercure	ng	293,2	13,46	35,9	0,08
Napropamide	mg	8,4	0,006	1,8.10 <sup>-6</sup>	3,2.10 <sup>-7</sup>
Simazine	mg	2,8	0,78	-	-

Ce tableau regroupe les principaux flux élémentaires sortants. Ces flux ont été sélectionnés selon plusieurs critères : leur contribution massique, leur intérêt pour le sujet à l'étude (émissions liées aux fertilisants, aux engrais, aux herbicides) et à leurs impacts. Dans la catégorie du changement climatique, on voit que le pétrole émet le plus de CO<sub>2</sub> fossile. Les autres carburants en émettent un peu, tout d'abord à cause du mélange (15% volumique est du pétrole) mais aussi à cause de la machinerie utilisée lors des cultures. On voit ici que les cultures génèrent cependant du N<sub>2</sub>O, qui est lui aussi très dommageable et qui confirme les dires de Crutzen, à savoir que l'utilisation de biomasse peut au final générer plus d'émissions de certaines substances que l'essence (Crutzen et al., 2008). La culture de saule, avec l'utilisation de lisier comme moyen de fertilisation, est principalement responsable des émissions de NH<sub>3</sub>. En regardant ces émissions dans l'air, il est possible d'anticiper le fait que les biocarburants semblent avoir plus d'impacts sur la santé humaine que le carburant fossile. De même au point de vue des particules, quels que soient leurs diamètres, les biocarburants en émettent plus. En regardant les émissions aquatiques, il apparaît que les éthanol de maïs ou de canne émettent bien plus de produits toxiques que le saule. Les émissions du compartiment sol permettent de voir les résultats des applications d'engrais, d'herbicides et d'insecticides. La culture de la canne semble très dommageable, cela se remarque par les fortes émissions d'aldrine, un insecticide chloré très nocif. Il y a également plus d'arsenic qui se retrouve dans le sol avec cette culture. L'effet de la biorémédiation a été pris en compte dans le processus ecoinvent de culture du maïs. Cette capacité réduit considérablement les impacts sur la qualité des écosystèmes, grâce à la capture des métaux présents dans le sol (données sur le cuivre dans le tableau). Il faut donc imposer ici une limitation à cette comparaison pour cette caractéristique puisque la phytoremédiation du saule n'a, elle, pas été prise en compte. Des résultats de la même tendance pour le cuivre et d'autres métaux dans le sol, pourraient être alors attendus. Des résultats complémentaires reviendront sur la décision d'avoir conservé le processus, par défaut, non modifié et présenteront des résultats pour le saule avec la phytoremédiation, mais aussi des résultats pour le maïs sans la biorémédiation.

### 3.1.2 Les résultats du saule : contribution des processus

Le cycle de vie de l'E85 à partir de saule est ensuite analysé avec IMPACT 2002+ et la contribution des étapes peut être observée à la Figure 3-1.

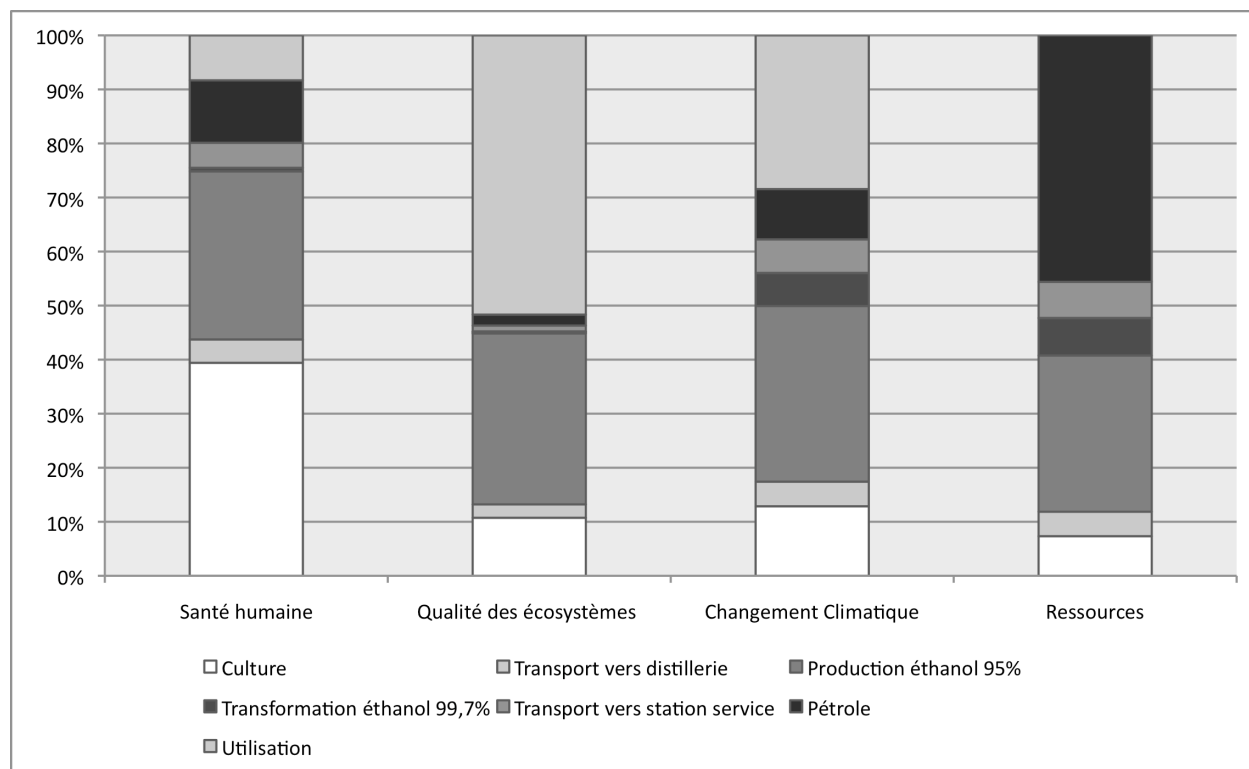


Figure 3-1 : Contribution des étapes du cycle de vie de l'E85 saule (IMPACT2002+)

Les résultats en unité de dommages ne sont pas donnés ici, car sans comparaison, ces résultats représentent peu d'intérêt. Il s'agit dans un premier temps d'évaluer la contribution des différentes étapes du cycle de vie de l'E85 à base de saule. Il apparaît clairement, que la culture du saule joue un rôle principal sur les impacts en santé humaine. En effet l'usage de fertilisants contribue considérablement dans les résultats observés. Le résultat d'inventaire avait déjà mis en évidence les fortes émissions en arsenic, dioxines ou encore en napropamide. Le diesel consommé dans les machines agricoles explique les impacts de la culture sur la consommation de ressources. Le processus de culture semble avoir peu d'impacts sur la qualité des écosystèmes, fait qui peut paraître étonnant. Dans cette étude la transformation des terres n'a pas d'impact, les facteurs de caractérisation d'IMPACT 2002+ ont une valeur nulle. L'occupation de la terre se fait en tant que forêt à courtes rotations, ce type d'occupation n'a pas non plus de facteur de

caractérisation générant des impacts. De plus, du lisier est utilisé comme engrais, les émissions de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{NO}_x$  qui s'en dégagent génèrent des impacts en changement climatique.

La conversion en éthanol 95% contribue pour presque la moitié des impacts de chaque catégorie. Cette étape utilise de nombreux produits chimiques, et est exigeante en ressources énergétiques. L'opération de la voiture a principalement des effets sur la qualité des écosystèmes ou sur le changement climatique. Pour finir, la production de la portion de pétrole n'est pas négligeable : elle concourt majoritairement à la consommation de ressources non renouvelables.

### 3.1.3 Comparaison avec les autres systèmes de produits

Afin d'évaluer le potentiel de cette nouvelle source de carburant, le système de produits est comparé aux trois autres carburants décrits précédemment.

#### 3.1.3.1 Comparaison des résultats : catégorie problèmes

Suite à une modélisation des impacts avec IMPACT 2002+, la Figure 3-2 présente les impacts de la catégorie problèmes (midpoint). Les résultats sont ramenés sur une base de 100%, attribué au pire carburant, afin d'être représentés sur le même graphique.

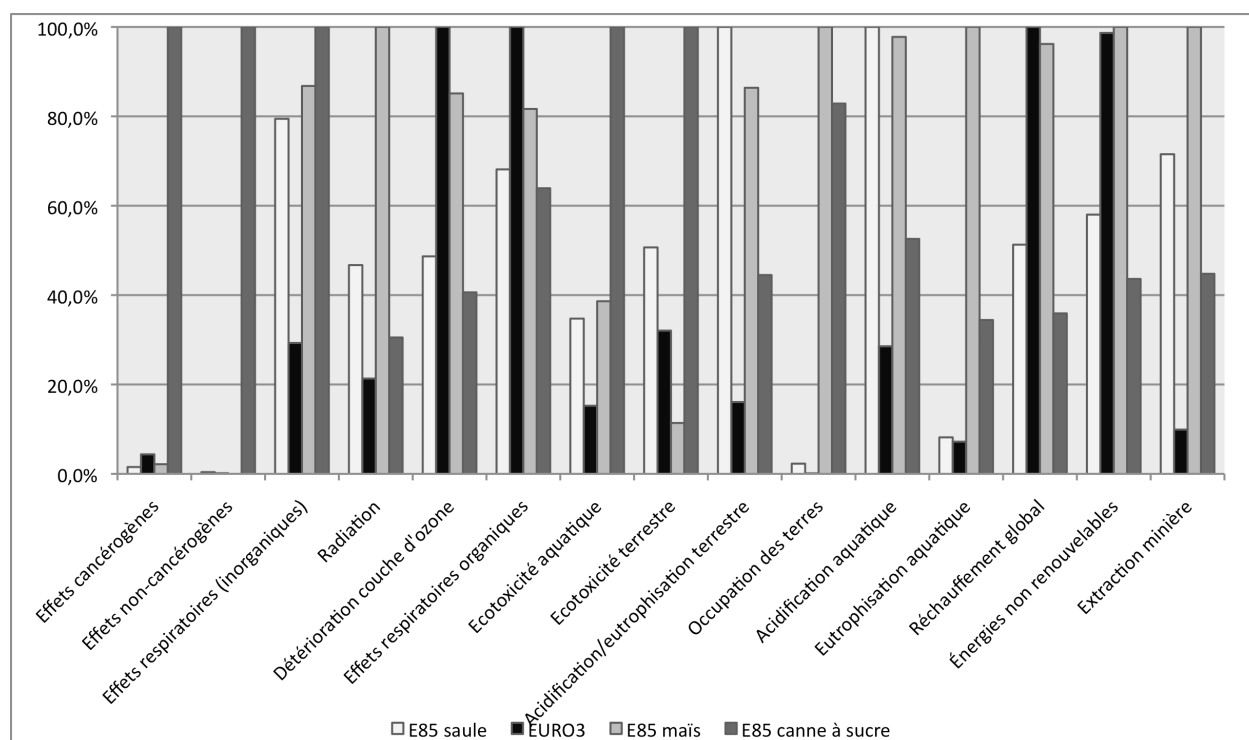


Figure 3-2 : Comparaison des systèmes de produits : catégorie problèmes (IMPACT 2002+)

Ces résultats sont intéressants. En effet, selon la catégorie de problèmes, le carburant ayant le meilleur score change. Sur les 15 catégories observables ici, l'E85 à base de saule génère le plus d'impacts seulement dans deux catégories. Le pétrole semble être le plus néfaste dans trois catégories, l'E85 de maïs dans cinq catégories et l'E85 de canne dans les cinq restantes. Le E85 à partir de canne génère beaucoup d'impacts dans les catégories suivantes : les effets cancérogènes, les non cancérogènes, et les effets respiratoires qui auront par la suite des effets sur la santé humaine. La culture de la canne est très dommageable et est responsable de nombreuses émissions comme les dioxines ou encore les particules (surtout  $< 2,5 \mu\text{m}$ ). Le maïs est, quant à lui, le plus dommageable pour l'occupation des terres, qu'il occupe en tant que terre arables non irriguées. Sa culture, qui demande elle aussi beaucoup d'entretien, et ses rendements de conversion qui sont moins élevés, font que cet E85 n'apparaisse pas comme la meilleure option pour la lutte contre le changement climatique. Le lisier utilisé pour la culture du saule explique les problèmes d'acidification. Bien que ces résultats paraissent favorables pour l'éthanol cellulosique de saule, il est impossible de conclure strictement vu que deux catégories restent problématiques.

### 3.1.3.2 Comparaison des résultats : catégorie dommages et contribution des processus

La comparaison en score de dommages (endpoint) est présentée à la Figure 3-3.

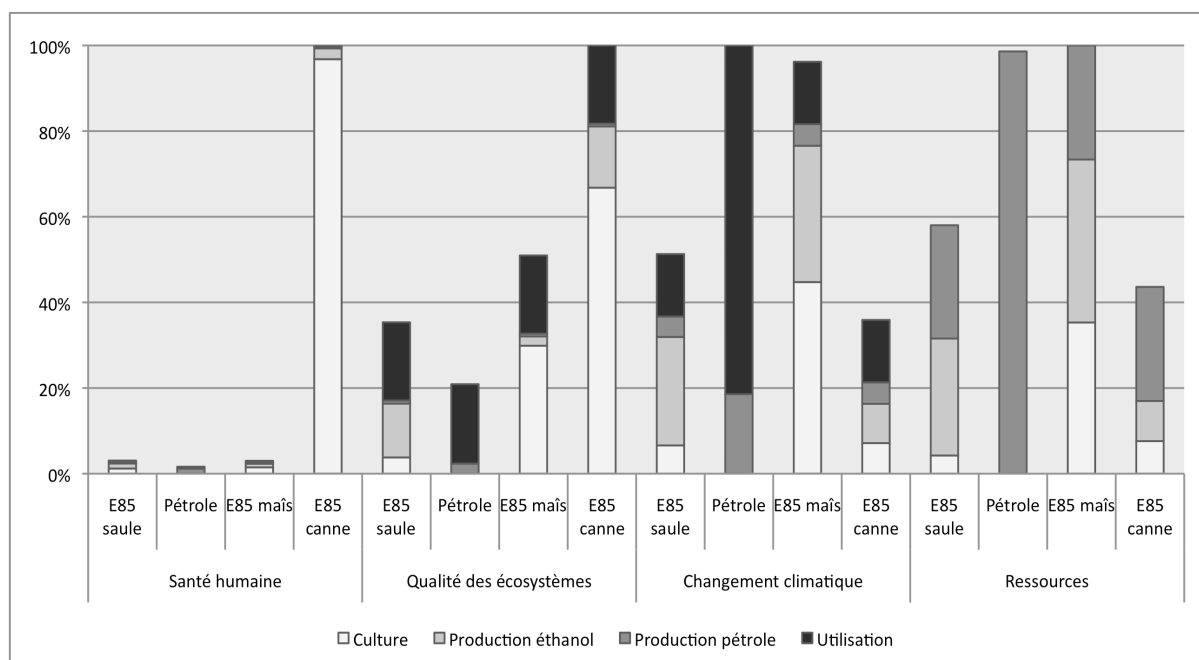


Figure 3-3 : Comparaison des systèmes de produits : score de dommages (IMPACT 2002+)

Il apparaît ici que la canne à sucre est la biomasse dont la culture produit le plus d'impacts sur la santé humaine. Comme il avait été discuté lors de l'analyse de l'inventaire, beaucoup de pesticides et herbicides sont utilisés pour cette culture. En revanche les bons rendements de conversion de la canne en éthanol assurent des impacts faibles en changement climatique. Le pétrole est donc le carburant générant le moins d'impacts sur la santé humaine. Cela s'explique par le fait que les différentes cultures utilisent de nombreux pesticides ou herbicides, même si ces utilisations ne se font pas à la même échelle suivant la culture. L'éthanol de maïs est le biocarburant ayant le plus d'impacts sur la catégorie du changement climatique. En plus des fortes émissions de CO<sub>2</sub> dues à la machinerie, les pesticides utilisés émettent beaucoup de N<sub>2</sub>O, important gaz à effet de serre. La machinerie de la culture de maïs explique aussi la forte consommation de ressources de cette dernière. Le E85 de saule, le principal produit à l'étude, accuse des impacts légèrement supérieurs au pétrole pour la catégorie de la santé humaine. Même si la plantation de saule est peu exigeante en fertilisants, elle reste responsable de plus de la moitié des impacts de cette catégorie. Le rendement de conversion du saule en éthanol est plus faible que celui de la canne, le procédé utilise donc plus d'énergie et de ressources (gaz naturel). Cependant cet E85 est le plus avantageux des biocarburants pour la qualité des écosystèmes. Il représente aussi une meilleure alternative au pétrole ou à l'E85 de maïs pour lutter contre le changement climatique et la consommation de ressources non renouvelables.

Néanmoins ces résultats sont issus d'une analyse des flux physiques directement liés aux systèmes de produits. Les prochains résultats montrent les impacts engendrés indirectement par la culture du saule.

## 3.2 Résultats de l'ACV-C

L'extension des frontières a surtout consisté en l'identification des processus affectés par le besoin de combler le manque de maïs au Canada. Dans cette section, sont présentés les résultats des calculs de quantification des scénarios, ainsi que l'évaluation des nouveaux impacts. Les résultats des six scénarios de Schmidt sont introduits en premiers pour finir par les résultats du scénario mieux adapté au cas canadien.



### 3.2.1 Quantification des scénarios de Schmidt

Le Tableau 3-3 ci-dessous récapitule les technologies affectées dans cette étude.

Tableau 3-3 : Résultats des calculs des six scénarios

<b>Scénarios</b>	<b>Résultats</b>
<b>1</b>	<b>0,196 m<sup>2</sup></b> de terre supplémentaire pour la culture du maïs au Canada
<b>2</b>	<b>2,5 g de N</b> ajouté sur une culture de maïs déjà existante au Canada
<b>3</b>	<b>0,196 m<sup>2</sup></b> de prairie supplémentaire pour la culture de l'orge au Canada
<b>4</b>	<b>0,183m<sup>2</sup></b> de terre supplémentaire pour la culture de maïs aux USA
<b>5</b>	<b>3,5 g de N</b> ajouté sur une culture aux USA
<b>6</b>	78,8 % du maïs produit au Canada (élasticité des prix)
	<b>0,08 m<sup>2</sup></b> au Canada et <b>0,9g de N</b> ajouté
	<b>0,01 m<sup>2</sup></b> aux USA et <b>0,5 g de N</b> ajouté

Ces différentes valeurs représentent donc la quantification des technologies affectées, des six scénarios proposés à l'origine par Schmidt. Les surfaces supplémentaires à occuper (et éventuellement à transformer) ainsi que les quantités d'azote à ajouter sont désormais connues. Maintenant qu'elles ont été quantifiées, ces technologies supplémentaires doivent être incluses à l'analyse pour l'évaluation des impacts. Elles sont donc ajoutées à l'inventaire de l'ACV-A pour constituer un inventaire aux frontières élargies, qui prend en compte les conséquences du changement d'utilisation de la terre et qui est donc l'inventaire de l'ACV-C. Dans un second temps, les impacts environnementaux sont modélisés. Cependant, un point essentiel pour la suite de l'étude est de sélectionner le scénario qui est le plus adapté à cette étude de cas canadienne. Les résultats des calculs pour ce scénario additionnel sont présentés à la section suivante.

### 3.2.2 Résultats des calculs du scénario mieux adapté à la situation canadienne

La Figure 3-4 ci-dessous récapitule les résultats obtenus pour la construction du scénario canadien, suivant les diverses recommandations présentées à la section 2.2.4. Comme il a été précisé à la section 2.2.4, les calculs, à savoir les quantités d'azote ajoutées, les surfaces de terres supplémentaires, ou encore l'identification des cultures affectées ou du pays importateur, suivent toujours les recommandations de Schmidt, et ont été faits, pour la majorité, de la même façon que pour les calculs des six premiers scénarios.

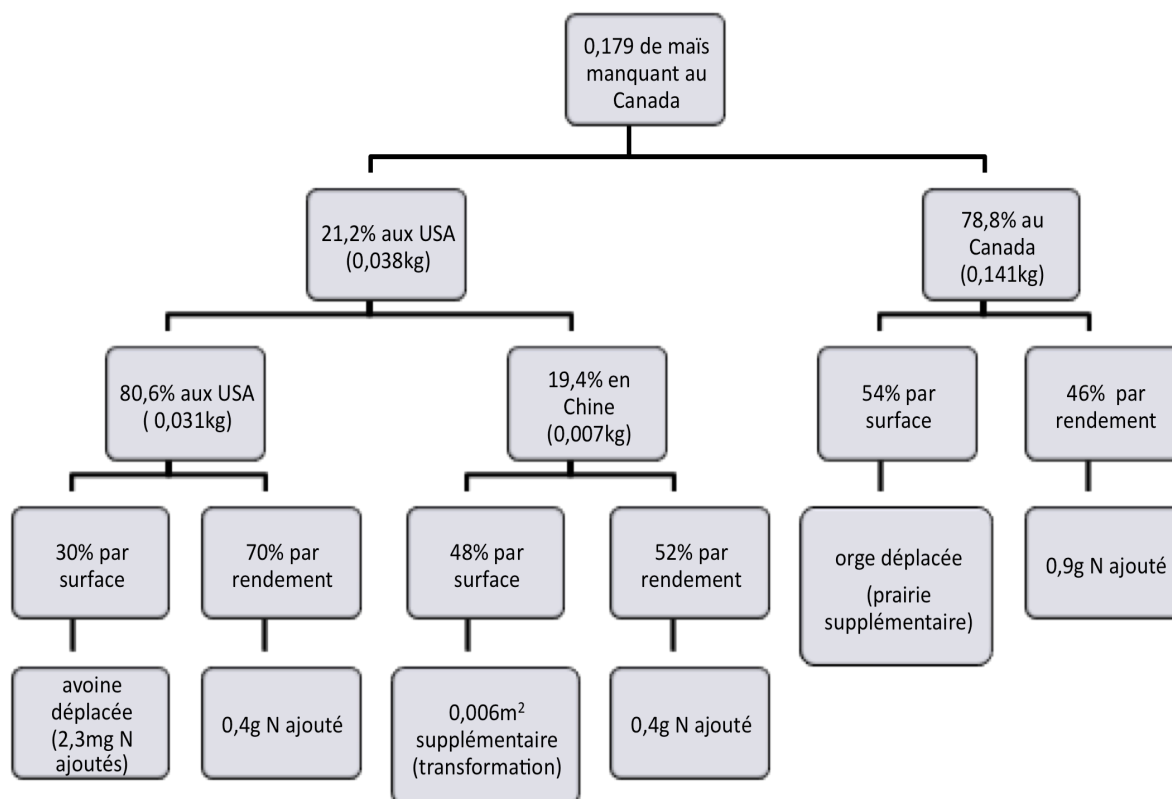


Figure 3-4 : Résultats des calculs du scénario canadien

Toutes ces technologies et les quantifications sont à intégrer dans le système de produits à l'étude. Ces processus supplémentaires sont donc eux aussi ajoutés à l'inventaire de l'ACV-A pour constituer le septième scénario étudié lors de l'ACV-C. Les nouveaux impacts ont été analysés, toujours avec la méthode IMPACT 2002+.

### 3.2.3 Les impacts potentiels de l'ACV-C

Les impacts de ces sept scénarios sont présentés ici à la Figure 3-5 et sont comparés entre eux. Il s'agit donc des impacts potentiels du scénario E85 saule de l'ACV-A auxquels sont rajoutés les impacts des processus affectés dans les sept scénarios étudiés ici. Les résultats sont normalisés par rapport aux résultats pour le nouveau scénario canadien qui sont ramenés à 100%. Il est possible de remarquer de nettes différences entre les scénarios. Dans la catégorie de la qualité des écosystèmes la différence entre les résultats de deux scénarios peut atteindre jusque 88%. Le point important à remarquer ici est que les résultats changent manifestement d'un

scénario à l'autre et qu'il est donc indispensable de trouver un scénario réellement adapté à la situation étudiée.

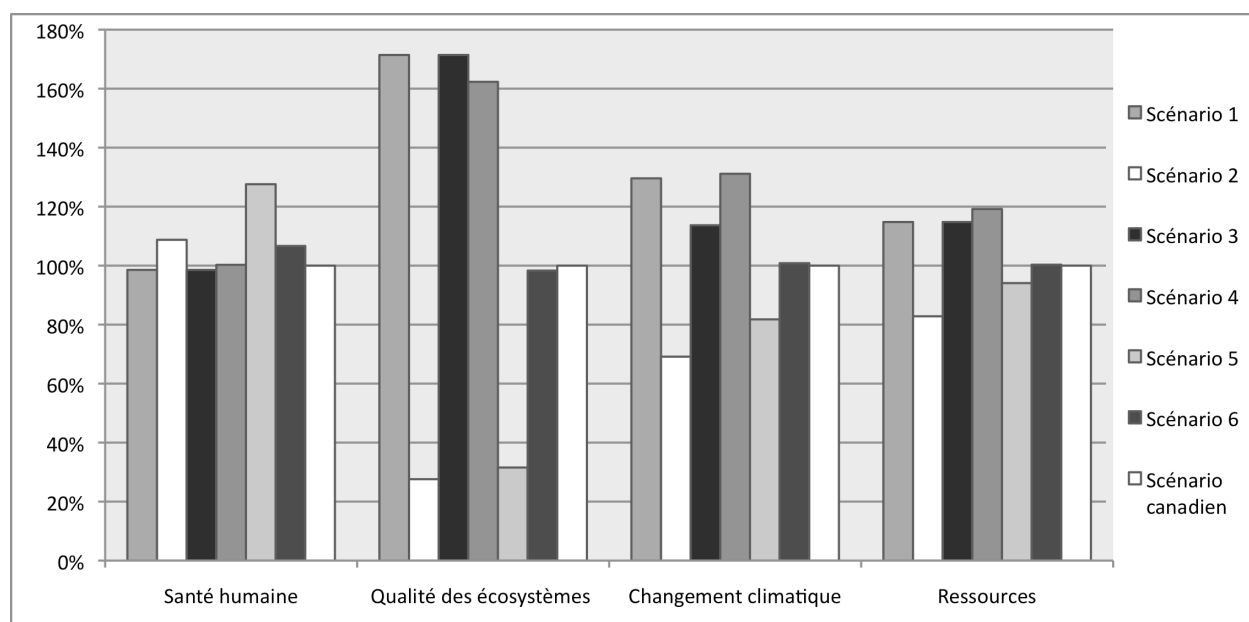


Figure 3-5 : Résultats des sept scénarios en score de dommage (IMPACT 2002+)

Le scénario canadien, a été créé afin d'ajouter encore plus de réalisme dans cette étude. Dans les quatre catégories de dommages, il semble avoir des résultats intermédiaires, et moins extrêmes que les autres scénarios initialement proposés par Schmidt. Suite aux résultats des calculs de la section 3.2.2, il est intéressant d'étudier la contribution de chaque pays, dans les impacts du scénario canadien. A titre d'exemple, la contribution des trois pays affectés, le Canada, les États-Unis et la Chine, dans les impacts de l'extension des frontières est évaluée pour la catégorie qualité des écosystèmes. Comme cette étude s'intéresse à la culture du maïs et à l'occupation des terres, il semble intéressant de regarder ce qu'il se passe pour cette catégorie. De plus, comme il a été vu à la Figure 3-5 ce scénario a des impacts intermédiaires dans cette catégorie. Les résultats sont présentés ici à la Figure 3-6. Il est ainsi possible d'évaluer la contribution de chaque pays dans les impacts de l'extension des frontières, c'est-à-dire les impacts des processus affectés. Les résultats pour les autres catégories sont disponibles à l'Annexe VI.

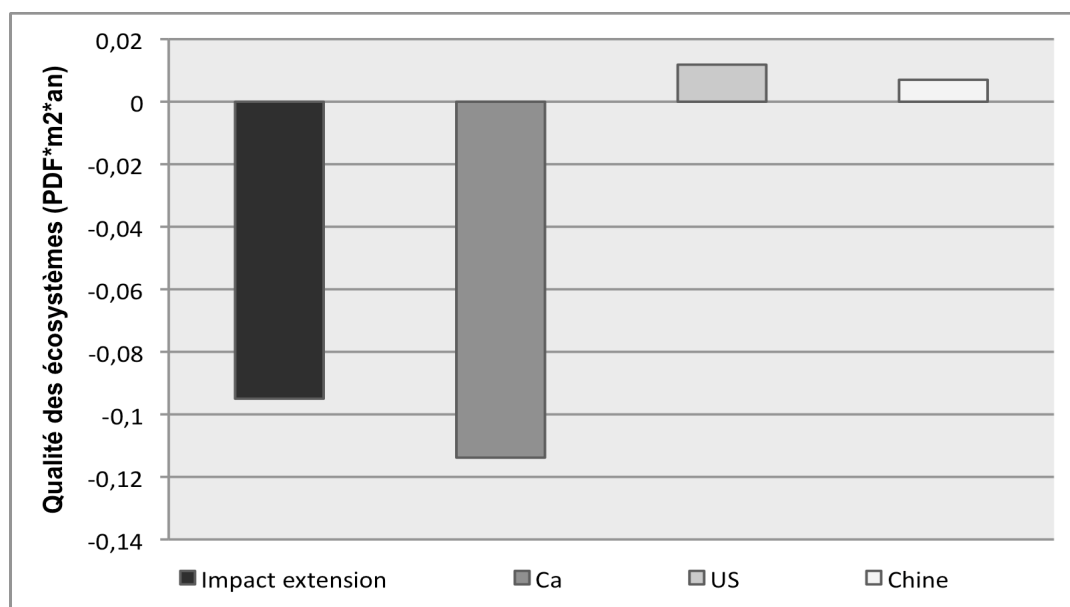


Figure 3-6 : Contribution des pays affectés dans la catégorie qualité des écosystèmes

Il apparaît ici que les processus affectés au Canada sont les principaux contributeurs des impacts de l'extension des frontières dans cette catégorie. Ces résultats sont négatifs, puisqu'au Canada, une culture de maïs est déplacée, les impacts de ce processus de culture, ainsi que de l'occupation de la terre sont déduits. Bien qu'une partie de la nouvelle production soit directement faite au Canada, les nouveaux impacts engendrés ne dépassent pas les impacts de l'ancienne occupation des terres. La Chine, quant à elle, a une faible contribution dans les impacts de l'extension des frontières. Cette contribution chinoise est de 2,25% dans cette catégorie et peut aller jusqu'à 4,35% dans la catégorie santé humaine. Ces impacts additionnels sont ensuite ajoutés aux impacts du système de produits E85 saule précédemment évalués, afin d'obtenir les impacts totaux du système avec frontières élargies.

Après avoir observé les différences manifestes entre les scénarios, la comparaison est faite avec les résultats de l'ACV-A. Les différences observées sont expliquées au point suivant 3.3.

### 3.3 Comparaison des résultats des deux approches

Les nouveaux impacts potentiels, obtenus après l'évaluation des impacts des sept scénarios, sont ici comparés. Les impacts des six scénarios de Schmidt sont, dans un premier temps, étudiés et comparés avec ceux de l'ACV-A du système de produits E85 saule. Dans un second temps, les impacts du scénario canadien sont évalués, puis comparés avec ceux du sixième scénario de

Schmidt, ceux de l'ACV-A du système de produits E85 saule et ceux de l'ACV-A du système essence.

### 3.3.1 Résultats d'impacts des six scénarios de Schmidt

Ci-dessous sont présentés à la Figure 3-7, les résultats d'impacts en catégories dommages (IMPACT 2002+) des six scénarios de la méthode de Schmidt. Les résultats d'impacts sont normalisés par rapport aux impacts de l'ACV-A, qui sont ramenés à 100%.

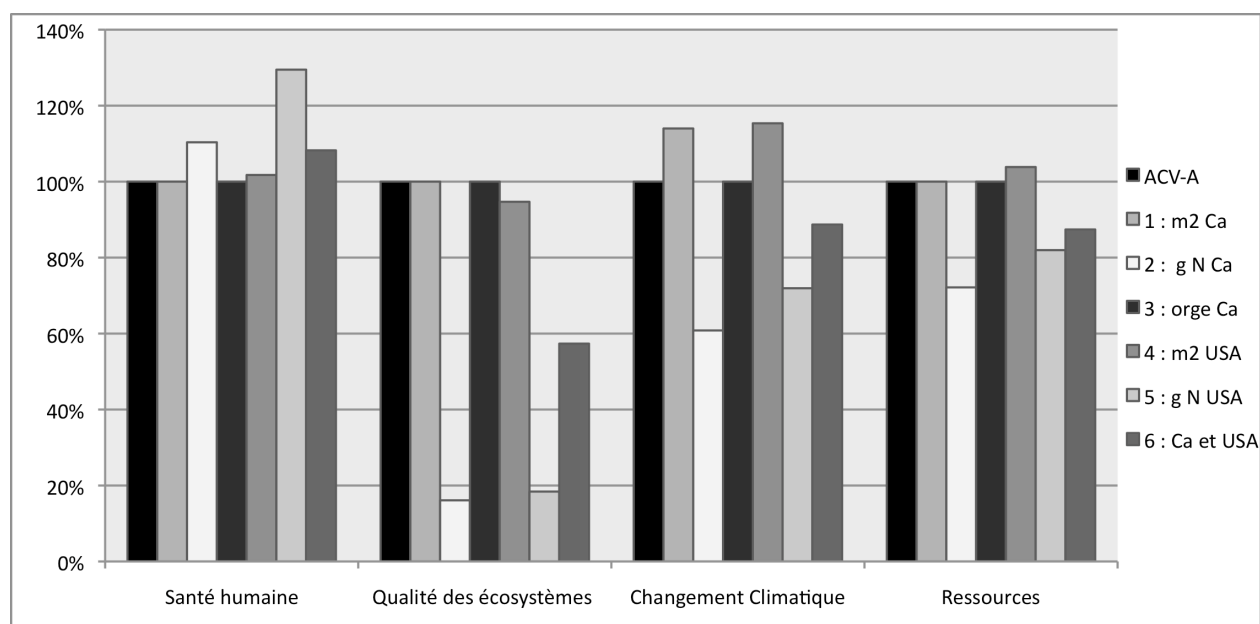


Figure 3-7 : Résultats des six scénarios en score de dommages (IMPACT2002+)

Ces résultats montrent les différences obtenues entre les résultats de l'approche axée sur les attributs et les résultats des six scénarios de Schmidt qui prennent en compte les conséquences de la diminution de l'offre en maïs au Canada. Pour certains scénarios, le 2, 5 et 6 notamment les différences sont appuyées. Les impacts sont jusqu'à 29% plus élevés en santé humaine et jusqu'à 82% plus faibles pour la qualité des écosystèmes. Ceci s'explique par le fait que dans ces scénarios, le maïs nécessaire est produit grâce à une amélioration de rendement existant, c'est-à-dire par ajout d'azote. Ces ajouts ont beaucoup d'impacts néfastes pour la santé humaine, ainsi que sur le changement climatique avec les émissions de  $N_2O$ . En revanche, en augmentant le rendement d'une culture déjà existante, on occupe moins de terres arables. L'occupation arable ayant normalement beaucoup d'impacts sur la qualité des écosystèmes, ceci explique pourquoi pour ces scénarios les impacts sont diminués dans cette catégorie. Les différences observées pour

la catégorie changement climatique ont trois origines principales. En plus des émissions de  $N_2O$  de certains scénarios, la terre peut subir des transformations. Ainsi, pour le scénario numéro 1 où l'on augmente la surface cultivée, une transformation de prairie vers une terre arable est considérée. Pour les trois derniers scénarios le transport additionnel explique aussi une partie des impacts de la catégorie changement climatique. Cependant, dans le cas des scénarios 2 et 5, une culture de maïs disparaît (celle transformée en plantation de saule), elle est compensée par un ajout d'azote sur une culture déjà existante dont les impacts ne sont pas attribués ici au maïs supplémentaire. La culture de maïs a normalement beaucoup d'impacts sur le changement climatique et la consommation de ressources, comme il a été vu à la section 3.1.3. Les impacts de ces scénarios ont donc diminué en comparaison des impacts de l'ACV-A. Le scénario 6, qui considère une production locale et des importations présente des résultats intermédiaires qui varient tout de même jusqu'à -43% dans la catégorie qualité des écosystèmes.

### 3.3.2 Résultats d'impacts du scénario mieux adapté à la situation canadienne

Ci-dessous sont présentés à la Figure 3-8 les résultats d'impacts en catégories dommages (IMPACT 2002+) du nouveau scénario, adapté au cas canadien. Les résultats d'impacts sont normalisés par rapport aux impacts de l'ACV-A, qui sont ramenés à 100%.

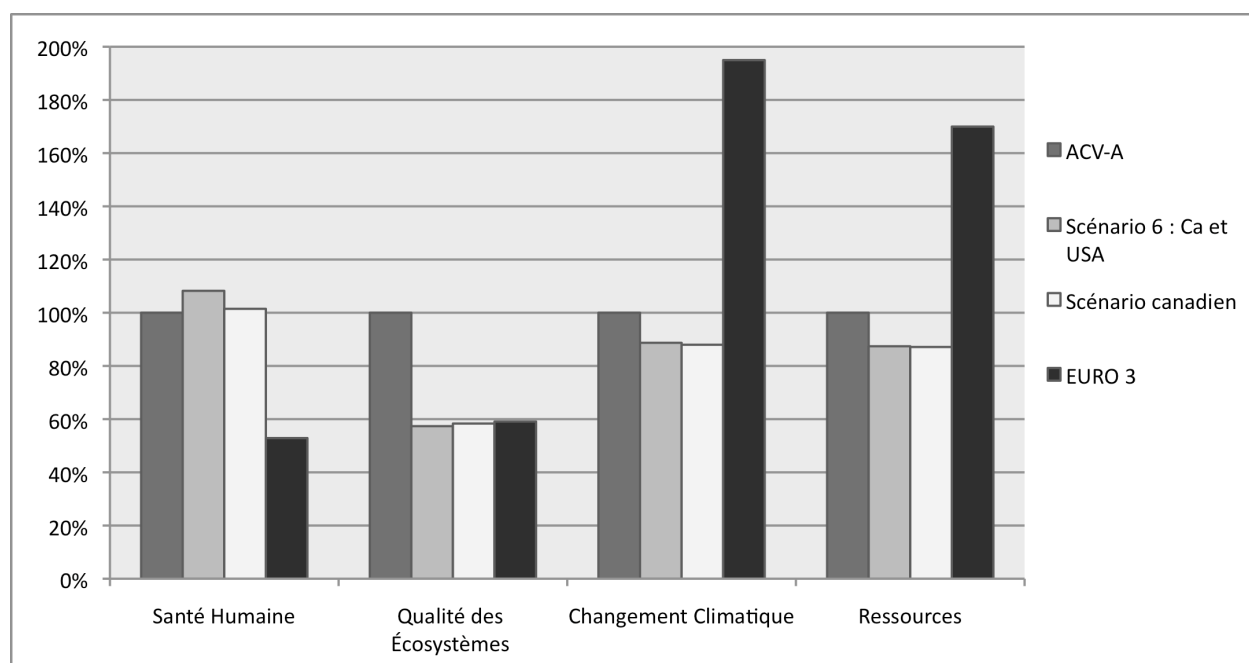


Figure 3-8 : Résultats du nouveau scénario en score de dommages (IMPACT2002+)

Il est important de préciser ici que la comparaison avec le pétrole est faite afin de voir l'évolution des résultats. Le système de produits pétrole n'ayant pas un inventaire conséquentiel, la comparaison n'aurait normalement pas lieu d'être faite. Cependant, la complexité pour construire un inventaire conséquentiel pour un système de produits essence est telle, que la comparaison est tout de même faite afin de voir les changements engendrés par une ACV qui prend en compte les effets des changements d'utilisation d'une terre.

Comme le scénario mieux adapté à la situation canadienne est lui aussi une combinaison entre plusieurs pays et technologies affectées on le compare avec le 6ème scénario de Schmidt, pour évaluer les changements apportés par le test de la seconde boucle pour les États-Unis. Pour les trois dernières catégories d'impacts, à savoir la qualité des écosystèmes, le changement climatique et les ressources, il y a peu de différences entre le scénario 6 et le scénario canadien. Le E85 québécois à base de saule, même avec une approche d'élargissement des frontières de l'étude, demeure nettement moins dommageable que le système de produits pétrole, pour le changement climatique ou la consommation de ressources non renouvelables. Il est intéressant de remarquer que les impacts du scénario canadien sont inférieurs à ceux du 6ème scénario pour la santé humaine. Ceci s'explique par le fait que dans le scénario canadien, une partie du maïs nouvellement produit et venant de la Chine a été produit en transformant une nouvelle terre et non en déplaçant une céréale dont il a fallu ajuster le rendement. Ainsi, dans ce scénario il y a un peu moins de production de maïs augmentée par rendement, donc un peu moins d'utilisation d'azote. Ces impacts sont à peine supérieurs à ceux obtenus par l'ACV-A (+1,5%), mais la légère hausse est due à l'engrais tout de même ajouté. Le point intéressant est le résultat sur la qualité des écosystèmes. Alors que l'approche axée sur les attributs montrait clairement que le E85 engendre beaucoup plus d'impacts que le pétrole. Les résultats de l'ACV-C semblent dire que les impacts seraient en fait similaires, voire même inférieurs. Concernant le changement climatique et les ressources, les impacts de l'ACV-C sont diminués d'environ 10% par rapport aux résultats de l'ACV-A, et ce, malgré le transport additionnel. Le fait qu'une partie du maïs (presque 50% dans le cas du scénario canadien) soit compensé par de l'ajout d'engrais et non une autre culture entière de maïs épargne beaucoup d'émissions. En effet, il a bien souvent été précisé dans ce rapport que le processus de culture en lui-même est très impactant pour ces deux catégories. Ainsi, même si l'ajout d'engrais génère des émissions ayant des impacts sur le changement

climatique ( $N_2O$  ou diesel utilisé dans la machinerie) ils sont de moindre ampleur que ceux d'une culture de maïs à part entière.

Il apparaît sur les résultats présentés ici, que le recours à l'ACV-C change nettement les résultats pour au moins trois catégories d'impacts : -42% pour la qualité des écosystèmes, -12% pour le changement climatique et -13% pour la consommation de ressources. De plus la tendance est inversée pour la catégorie qualité des écosystèmes et la conclusion est donc inversée. Le E85 serait donc une meilleure alternative au pétrole pour trois catégories d'impacts sur quatre. Cette étude montre alors l'importance de considérer plus de processus et de faire une extension des frontières. Malheureusement la méthode en elle-même et les simplifications utilisées tout au long du travail rajoutent beaucoup d'incertitudes. De nombreuses hypothèses ont aussi été posées que ce soit pour l'ACV-A à la section 2.1.3.1 ou pour l'extension de frontières à la section 2.2.3.1, notamment pour simplifier les processus à modéliser.

### **3.4 Résultats complémentaires**

Suite aux résultats présentés dans ce chapitre, il est important de vérifier la sensibilité des principaux paramètres, afin d'être certain qu'ils ne viendront pas influencer les résultats et perturber les conclusions de cette étude.

#### **3.4.1 La consommation des véhicules flex-fuel**

La consommation de ces véhicules a été basée sur une publication (Graham et al., 2008). Dans cet article, les véhicules flex-fuel utilisés pour les expérimentations sont deux Caravans de la marque Chrysler, modèles de 2002 et deux Siebrings de la marque Chrysler, modèles de 2004. Ces véhicules ont une forte consommation de E85 d'après les données de l'article. Le fait d'avoir construit le processus d'opération du véhicule sur ces données de consommation pour les systèmes de produits E85 surestime peut être les résultats. En effet, en supposant cette consommation surestimée et en la réadaptant à une consommation plus proche de celle d'un moteur normal et non modifié, on pourrait diminuer de presque 20% la consommation. La linéarité de l'ACV-A permet ainsi de conclure rapidement que les résultats des trois systèmes E85 seraient donc de 20% inférieurs. Ces nouveaux résultats sont présentés à la Figure 3-9.



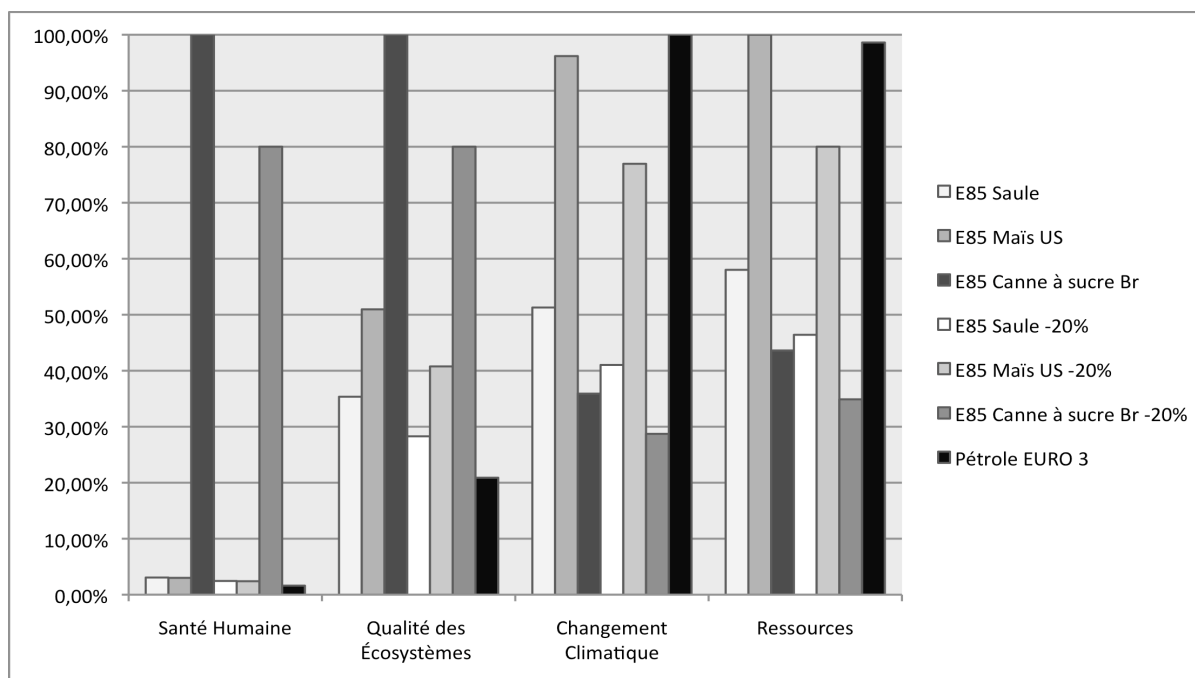


Figure 3-9 : Résultats suite à une diminution de 20% de la consommation en E85

Cette diminution de consommation n'engendre pas de changements profonds dans les résultats. En effet, l'E85 à base de saule reste tout de même plus dommageable que le pétrole pour la santé humaine et la qualité des écosystèmes.

Par la suite, lors du recours à l'inventaire en partie axé sur les conséquences, ce réajustement de la consommation entraîne une diminution de la quantité de bois nécessaire et donc de maïs déplacé. Pour la catégorie de dommages qualité des écosystèmes, où le E85 et le pétrole ont des impacts similaires, cette diminution entraîne un changement de tendance, le E85 devenant favorable.

Même si ces résultats sont sensibles, les données de la littérature ont été utilisées telles quelles.

### 3.4.2 La culture du saule

Cette étude utilise des processus de conversion de bois en éthanol qui ont été auparavant développés. Afin de tester les différences de résultats entre un processus de culture bâti à partir de données primaires et le processus tiré de la littérature, un deuxième cycle de vie de E85 à base de saule est analysé sur la base de l'unité fonctionnelle « Parcourir 1 km en voiture ». Les résultats

des deux approches, présentés à la Figure 3-10, sont comparés entre eux ainsi qu'avec les résultats du système essence.

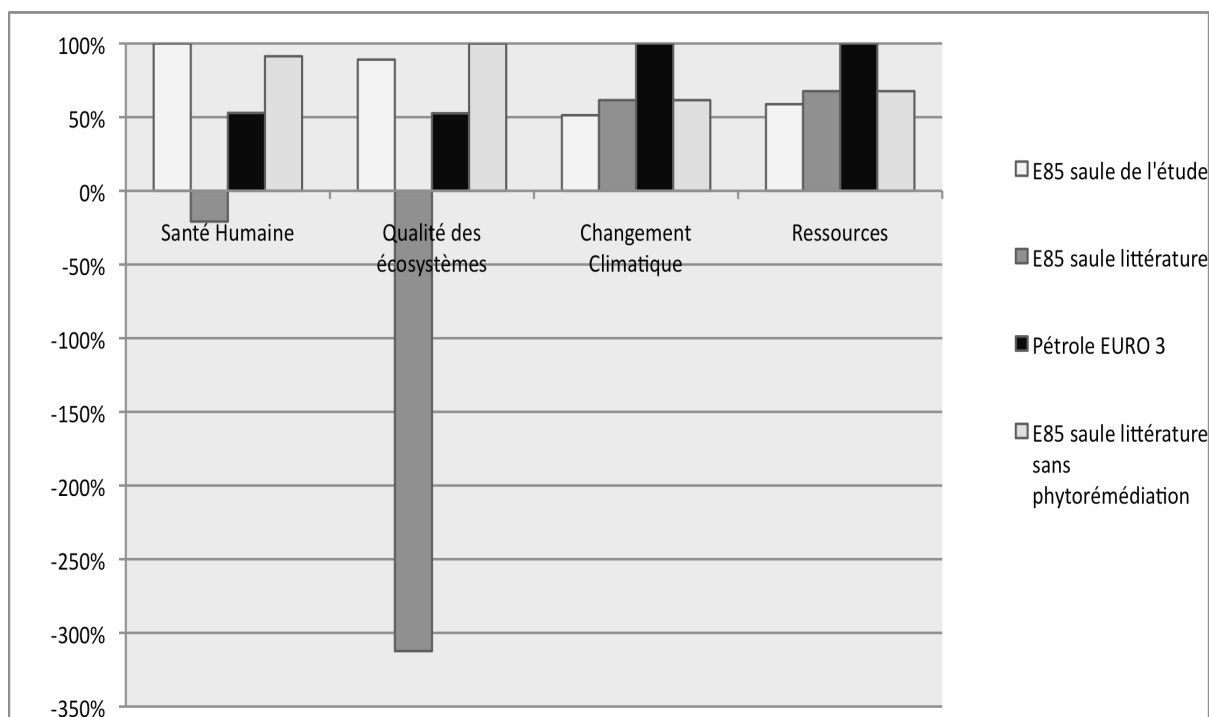


Figure 3-10 : Comparaison des résultats entre données primaires et données de la littérature

Il apparaît ici que le système de produits disponible dans la banque de données, fournit des résultats très différents pour les catégories santé humaine et qualité des écosystèmes. En effet, la capacité de phytoremédiation du saule est ici prise en compte comme il est recommandé par Jungbluth et al. (2008). Les métaux sont donc absorbés du sol, ce qui en améliore la qualité. Le résultat sur la santé humaine, à savoir un gain environnemental pour cette catégorie de dommages, est cependant surprenant. Ce sol n'entre pas directement en contact avec l'être humain. Le devenir des métaux dans le bois devrait être analysé plus précisément. Comme la prise en compte de cette capacité est controversée, le processus issu de la littérature *Operation, passenger car, ethanol 85% wood* plantation /CH est modifié pour ne pas prendre en compte la phytoremédiation. La comparaison des résultats de notre étude avec ces seconds résultats issus de la littérature est alors plus pertinente puisqu'ils ont les mêmes délimitations. Sans la phytoremédiation, les résultats de la littérature sont profondément perturbés, et la même tendance que les résultats de ce projet est observée. Néanmoins, les résultats diffèrent. Le E85 québécois, dont le cycle de vie est modélisé grâce à des données primaires, est plus dommageable pour la

santé humaine que celui considéré dans l'étude de Jungbluth sans la phytoremédiation. Les quantités, et les types de fertilisants diffèrent. Cependant le E85 québécois génère moins d'impacts dans les trois dernières catégories de dommages. Moins de diesel est consommé dans ce système de produits, expliquant alors les impacts moindres sur le changement climatique et l'utilisation plus faible de ressources non renouvelables.

### **3.4.3 Le carbone biogénique**

L'hypothèse a été posée de ne pas prendre en compte le carbone biogénique dans le cycle de vie des biocarburants. La capture du CO<sub>2</sub> biogénique lors de la croissance de la biomasse ainsi que les émissions lors de la combustion de l'éthanol dans le moteur ne sont pas considérées dans les travaux du US EPA, pour cause de cycle neutre (les entrants équivalent aux sortants) (US EPA, 2009). Suite à cette constatation la même hypothèse a été utilisée dans un premier temps. Néanmoins, le US EPA considère le méthane biogénique et le monoxyde de carbone biogénique lors de la combustion. Ces points qui avaient été négligés doivent alors être intégrés. Les processus ecoinvent, utilisés par défaut pour la modélisation des E85 de maïs et de canne à sucre, sont construits de sorte à prendre en compte dans l'inventaire ce carbone biogénique. Par soucis de pertinence, la prise en compte du carbone biogénique dans le cycle de vie du saule est étudiée ici. Ne possédant pas de données primaires sur la capacité de capture du CO<sub>2</sub> du saule, les données provenant des processus Jungbluth sont adaptées pour le E85 québécois à base de saule.

Bien que le carbone ait été considéré dès le début dans les cycles de vie des E85 de maïs et de canne à sucre, seuls les flux élémentaires peuvent être étudiés dans l'inventaire puisqu'aucun impact n'a été attribué au carbone biogénique. En effet, la méthode d'ÉICV IMPACT2002+ considère des facteurs de caractérisation nuls pour les émissions biogéniques. Le cycle biogénique est supposé être fermé dans cette méthode.

Néanmoins, en analysant l'inventaire des entrants/sortants biogéniques, il est intéressant de constater que le cycle n'est pas vraiment fermé, comme le montrent les données du Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Inventaire carbone biogénique

	Unité	E85 Saule	E85 Maïs	E85 Canne	EURO 3
<b>Entrant</b>					
CO <sub>2</sub> , biogénique	g	678,5	441	699,6	0,21
<b>Sortants</b>					
CO <sub>2</sub> biogénique	g	715	455,3	646,3	0,21
CO, biogénique	g	0,25	0,24	43	4,2 <sup>E-3</sup>
CH <sub>4</sub> , biogénique	mg	9,3	8,6	416,9	0,17

En effet, outre le problème d'adaptation des valeurs dans le cas du saule, les bilans massiques ne semblent pas entièrement justes. Deux étapes génèrent principalement le CO<sub>2</sub> biogénique, la combustion dans le moteur et l'étape de production de l'éthanol et la cogénération. L'imputation économique présente dans le processus de production d'éthanol semble être la cause de ces problèmes de calculs de bilans de masse.

Suite à ces différences, la méthode d'ÉICV est ajustée afin d'attribuer des impacts aux émissions biogéniques. Le CO<sub>2</sub> biogénique, le CO biogénique et le CH<sub>4</sub> biogénique ont désormais les mêmes facteurs de caractérisation que leurs homologues non biogéniques. Les nouveaux impacts obtenus, dans la catégorie changement climatique sont présentés dans la Figure 3-11 ci-dessous.

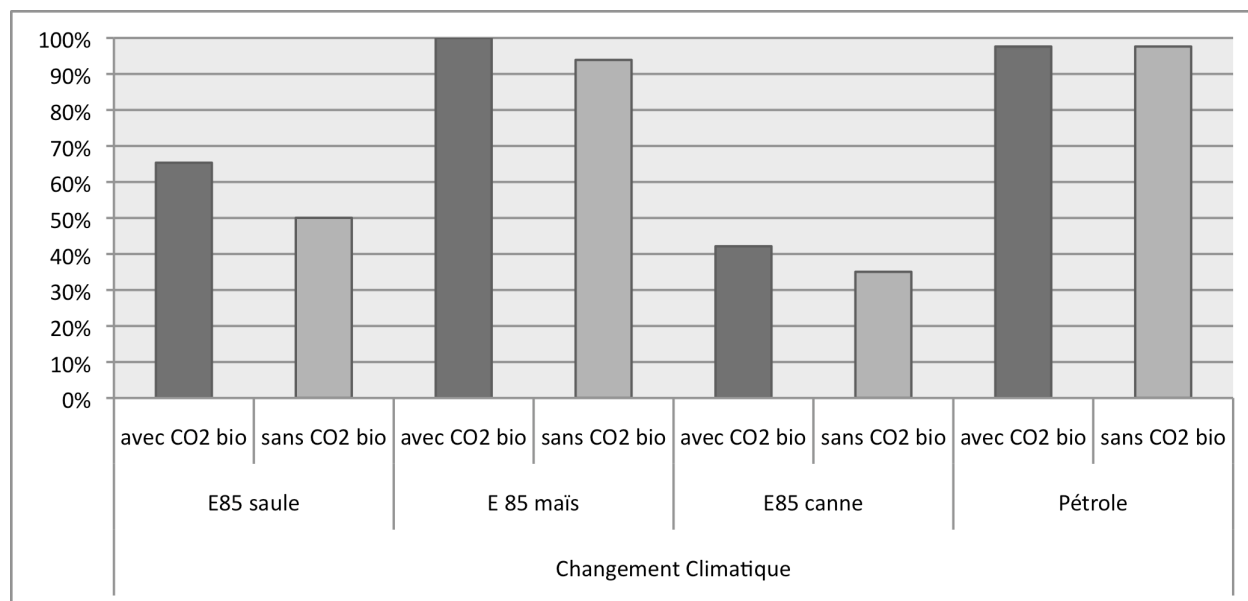


Figure 3-11 : Résultats d'impacts, changement climatique, avec carbone biogénique

Il apparaît ici que les résultats d'impacts changent. En effet, il y a une différence de +23% dans les résultats du E85 saule. En tenant compte du carbone biogénique, c'est le E85 de maïs qui devient le carburant ayant le plus d'impacts sur le changement climatique, dépassant alors le système essence. Pour le E85 de canne les changements sont également de grande ampleur avec une différence de +18%. Bien que le résultat d'inventaire montre que plus de CO<sub>2</sub> biogénique est stocké dans la canne que ce qui est émis, les émissions de CO biogénique et de CH<sub>4</sub> biogénique sont importantes. Le monoxyde de carbone et le méthane ayant des facteurs de caractérisation plus grands que le CO<sub>2</sub>, ces nouvelles émissions expliquent l'augmentation du score d'impact de l'E85 canne.

Suite aux différences observées entre entrants et sortants de carbone biogénique dans les cycles de vie étudiés et l'augmentation des impacts, il semblerait important de tenir compte du CO<sub>2</sub> biogénique. Cependant les problèmes de calculs de bilans de masse, qui ne donnent pas un cycle fermé pour les émissions de CO<sub>2</sub> biogénique, rendent difficile la conclusion. Il faudrait compléter la construction des étapes de cycles de vie par des données de la littérature, pour vérifier la différence entre capture et émissions de CO<sub>2</sub> biogénique d'une biomasse transformée en carburant.

### **3.4.4 La méthode d'évaluation des impacts : test de ReCiPe**

Afin d'évaluer la sensibilité face au choix d'une méthode d'ÉICV, les systèmes de produits à l'étude, ainsi que le système étendu lors de l'ACV-C, sont analysés avec la méthode ReCiPe. Cette nouvelle méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie, disponible depuis l'automne 2009, propose des indicateurs de problèmes et de dommages. Trois perspectives d'analyse sont proposées : hiérarchique, égalitaire et individualiste. L'égalitaire sera utilisée ici pour les analyses, puisque qu'elle se veut la plus préventive. Elle prend en compte un horizon temps lointain, et considère le plus d'impacts possible, même ceux dont les dommages n'ont pas été entièrement prouvés, mais dont quelques informations sont disponibles (Goedkoop et al., 2009). À la Figure 3-12 sont d'abord présentés les résultats endpoint comparatifs de l'ACV-A. ReCiPe propose trois catégories de dommages : la santé humaine dont l'unité est le DALY, la qualité des écosystèmes dont l'unité est Species\*yr (Espèces\*an) et les ressources en \$.

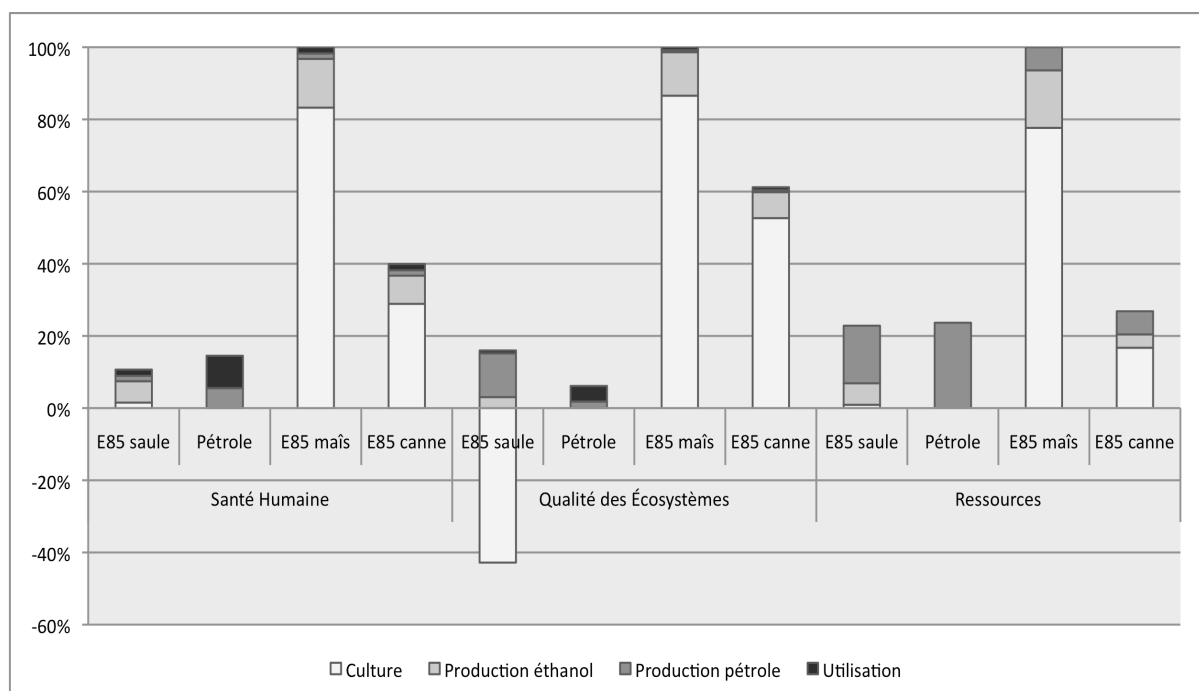


Figure 3-12 : Résultats comparatifs ACV-A (ReCiPe)

Contrairement aux résultats obtenus avec la méthode d'évaluation des impacts IMPACT2002+, les résultats présentés à la Figure 3-12 montrent clairement que l'E85 de saule est une meilleure alternative au pétrole et ceci pour les trois catégories de dommages. En effet, pour la qualité des écosystèmes, les impacts négatifs engendrés par la culture du saule font que le score de dommages de l'E85 saule est bien inférieur à celui du pétrole. Le principal contributeur est le changement d'utilisation de la terre et notamment la transformation de la terre arable en forêt à courtes rotations. En effet dans la méthode d'évaluation des impacts ReCiPe, la transformation des terres est évaluée. Des facteurs de caractérisation sont attribués aux différents types de transformation qui génèrent alors des dommages sur la qualité des écosystèmes. Il est intéressant de constater ici le revirement de situation pour la canne à sucre qui n'est plus la source de carburant la plus néfaste pour la santé humaine. Avec ces nouveaux facteurs de caractérisation, la culture du maïs est de loin la culture de biomasse qui engendre le plus d'impacts, et ce, dans toutes les catégories. L'analyse avec la méthode d'évaluation des impacts IMPACT2002+, nous avait montré que la culture du maïs est très dommageable pour le changement climatique. Dans ReCiPe, les impacts sur le changement climatique, que l'on peut observer en midpoint, sont partagés en endpoint entre la santé humaine et la qualité des écosystèmes. Ceci explique alors les résultats obtenus pour cet éthanol de maïs. Le pétrole obtient

en revanche de meilleurs résultats que les E85 maïs et canne pour les trois catégories. Il est néanmoins dépassé par le E85 saule qui devient donc la meilleure option, parmi les quatre proposées, et ce, pour toutes les catégories d'impacts rencontrées ici.

Les résultats comparatifs de l'ACV-A sont nettement perturbés par le changement de méthode d'évaluation des impacts. Ci-dessous la Figure 3-13 montre alors ce qu'il en est lorsque l'on étend les frontières de l'étude.

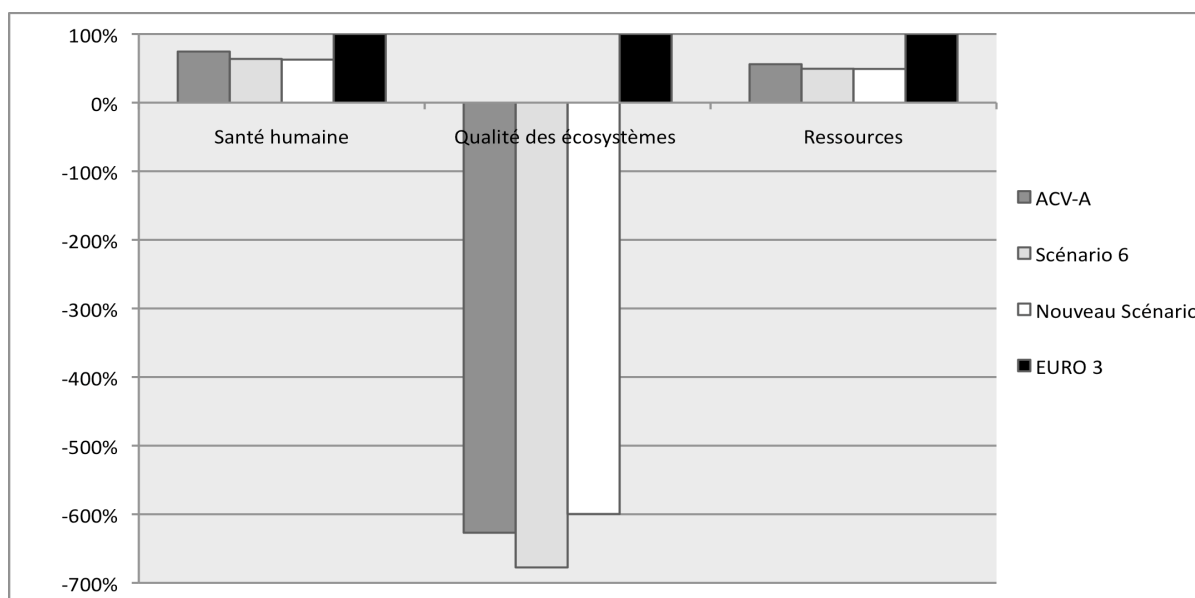


Figure 3-13 : Résultats ACV-C Endpoint (ReCiPe)

Ce graphique montre que les résultats changent peu pour la santé humaine ou les ressources. Comme il a été vu précédemment, les résultats d'impacts pour la qualité des écosystèmes sont négatifs. Même si la différence entre les résultats de l'ACV-A et ceux de l'ACV-C est de faible ampleur pour cette catégorie, la différence est plus importante entre le scénario 6 et le scénario canadien. Alors que les impacts du scénario 6 de Schmidt sont encore plus faibles que ceux de l'ACV-A, le nouveau scénario canadien est plus dommageable. Ceci s'explique par le fait que dans le nouveau scénario une partie de la compensation est faite en Chine, où a lieu une transformation des terres qui a donc des impacts sur la qualité des écosystèmes. Si le scénario 6 a, quant à lui, des impacts encore plus faibles, c'est qu'une partie du maïs produit va se faire en augmentant juste le rendement. Moins de terres arables seront occupées que dans le système axé sur les attributs ou que dans le scénario canadien avec la nouvelle occupation en Chine.

Le choix de la méthode d'évaluation des impacts est clairement un paramètre sensible lors d'une Analyse du Cycle de Vie. Ainsi, grâce au test de ReCiPe, de francs changements ont pu être observés. La première analyse suggère que cet E85 soit un véritable atout pour la protection de l'environnement. Les résultats de la deuxième étude, avec l'extension des frontières ne changent pas ce fait. Il conforte le choix de l'E85 saule, parmi les différents produits. Cependant, contrairement aux résultats obtenus avec IMPACT2002+, les différences ACV-A/ACV-C sont clairement moins marquées : presque 16% de moins pour la santé humaine, 12% pour les ressources et jusqu'à 4,5% en plus pour la qualité des écosystèmes, alors qu'on observait jusqu'à 42% de différence avec IMPACT2002+. Ils confirment tout de même l'hypothèse que l'ACV-C change les résultats. Il est intéressant de noter que la tendance est inversée. Alors qu'avec IMPACT 2002+ les impacts sur la santé humaine ou le changement climatique se voyaient augmentés lors de l'extension des frontières, les impacts des deux autres catégories étaient diminués et même drastiquement pour la qualité des écosystèmes. La différence présente ici peut être due au fait que la transformation de la terre a de l'impact dans la qualité des écosystèmes. Ainsi, pour cette étude où le changement d'utilisation de la terre est la conséquence étudiée, il semble intéressant d'utiliser une méthode qui possède des facteurs de caractérisation pour la transformation des terres. ReCiPe ayant été disponible seulement depuis l'automne 2009, les résultats avec IMPACT 2002+ demeurent les principaux résultats étudiés dans ce projet. Néanmoins, les résultats obtenus avec ReCiPe complètent l'analyse de ces résultats.

### **3.4.5 L'imputation dans le processus de production d'éthanol cellulosique**

Le processus de conversion de bois en éthanol est un processus de la base de données Jungbluth et al. (2008), utilisant les données d'ecoinvent 2.0. Ce processus est simplement adapté à cette étude. Il considère une approche d'imputation économique entre le kg d'éthanol 95% synthétisé et le kWh alors produit par la cogénération. Ce processus produit 1kg d'éthanol et génère 1 kWh d'électricité, mais 99,7% des impacts sont attribués à l'éthanol. Dans le cadre de la deuxième partie de cette étude, à savoir l'ACV-C et l'extension des frontières, il semble contradictoire de conserver une règle d'imputation dans ce processus directement lié au système de produits. Il avait été supposé dans un premier temps que cette faible imputation envers la production d'électricité, ne perturbait que très peu les résultats qui ne seraient en rien bouleversés. Afin de vérifier cette hypothèse et de pouvoir identifier le besoin ou non de



reprendre les calculs initiaux, une analyse de sensibilité est faite. Afin d'éviter cette imputation, 100% des impacts du processus de conversion de bois en éthanol sont attribués aux 0,09943 kg d'alcool. Néanmoins afin de prendre en compte les impacts évités par la cogénération d'électricité, les impacts de 0,09943 kWh de production d'électricité québécoise sont déduits des résultats. Les différences observées entre les résultats de cette extension complète, et de la première ACV-C ne sont pas très sensibles. En effet, la différence maximale est de -3,21% pour les impacts sur les ressources pour le nouveau calcul. Ces nouveaux résultats ne font qu'appuyer le fait que l'extension des frontières apporte des différences manifestes avec l'ACV-A, puisqu'avec ces nouveaux résultats, les différences avec l'ACV-A seraient de presque 15% en moins pour le changement climatique et les ressources. Malgré tout, les premiers calculs ayant été faits sont conservés.

### **3.4.6 La culture du maïs**

#### **3.4.6.1 Le processus de culture du maïs**

Un des processus les plus importants de cette extension de frontières est le processus modélisant la culture du maïs dans les diverses régions affectées par la perturbation de la demande canadienne. Suite à un manque de données, la culture du maïs au Canada et en Chine a été estimée à partir du processus américain disponible dans la base de données ecoinvent 2.0. Grâce aux données sur les rendements des cultures dans les différents pays (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b), une adaptation du processus américain est utilisée. Le processus de culture du maïs contribue fortement dans les différents scénarios étudiés. Afin de valider la portée de cette hypothèse, une analyse de sensibilité a été réalisée. Elle teste les différences de résultats obtenues si le même processus avait été considéré pour chaque pays, sans aucune adaptation (occupation des terres cependant mise à part). Les scores d'impacts obtenus sont jusqu'à 7,5% plus élevés pour la catégorie qualité des écosystèmes dans le cas où le processus canadien est identique au processus américain.

Le processus représentant la culture du maïs est donc assez sensible. Afin de diminuer les incertitudes sur les résultats engendrés par ce genre d'hypothèse, ce processus nécessiterait d'être adapté justement pour chaque pays concerné.

### 3.4.6.2 La biorémédiation du maïs

Un autre choix important dans ce projet a été de conserver le processus de culture du maïs, *Corn, at farm /US*, tel quel, c'est-à-dire considérant la biorémédiation du maïs. Cette hypothèse est très discutable. En effet, d'une part, comme la phytorémédiation du saule n'a pas été prise en compte dans cette étude, il ne semble pas consistant d'avoir conservé la capacité de biorémédiation du maïs. De plus, elle suggère que le sol, où a lieu la culture, soit contaminé. Un manque de données primaires pour le saule, et les grandes incertitudes sur la phytorémédiation elle-même, ont fait poser l'hypothèse que cette capacité ne serait pas prise en compte. Ainsi, dans le processus correspondant à la culture du saule, aucun flux n'est négatif. Les métaux (principalement cadmium, cuivre, zinc et nickel) ne sont pas absorbés du sol par la plante. Bien sûr, ne considérer aucune phytorémédiation pour le saule peut paraître comme le « pire scénario ». Ce scénario a été néanmoins adopté. Afin de rendre plus pertinentes la comparaison des E85 et l'extension des frontières, un scénario représentant lui aussi le pire cas pour la culture du maïs est considéré. Dans ces nouveaux calculs, les flux élémentaires négatifs correspondant à l'absorption du zinc, cuivre, nickel et cadmium sont alors annulés. Les impacts de l'ACV-C ainsi que de l'extension des frontières sont recalculés et les résultats de nouveau discutés. Tout d'abord sont présentés les nouveaux résultats de l'ACV-A, comme l'illustre la Figure 3-14.

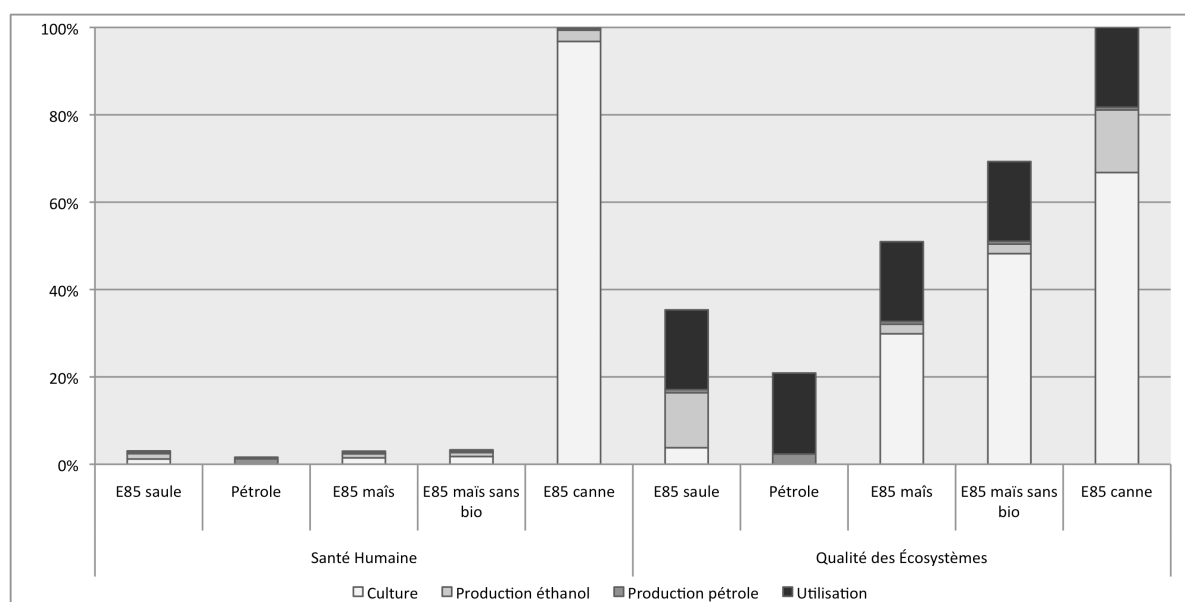


Figure 3-14 : Nouveaux résultats ACV-A, maïs sans biorémédiation

Il apparaît ici, que la culture du maïs en elle-même a désormais plus d'impacts sur la qualité des écosystèmes (environ +20%) et sur la santé humaine. Les métaux n'étant plus captés du sol, leur présence génère des impacts sur la qualité de ceux-ci. De même la présence de métaux dans le sol qui sert pour une culture vivrière explique les impacts sur la santé humaine puisque les métaux peuvent se transférer dans la céréale. Les impacts ne changent pas concernant le changement climatique ou les ressources. La présence ou non de métaux dans les sols ne joue pas sur ces catégories de dommages. Les résultats comparatifs ne sont cependant pas inversés, excepté le fait que désormais le E85 maïs est légèrement plus dommageable pour la santé humaine que le E85 saule.

Lors de l'extension de frontières, la culture du maïs joue un rôle important puisqu'elle est la culture déplacée par le saule. Dans la Figure 3-15 ci-dessous, sont présentés les impacts de l'ACV-C.

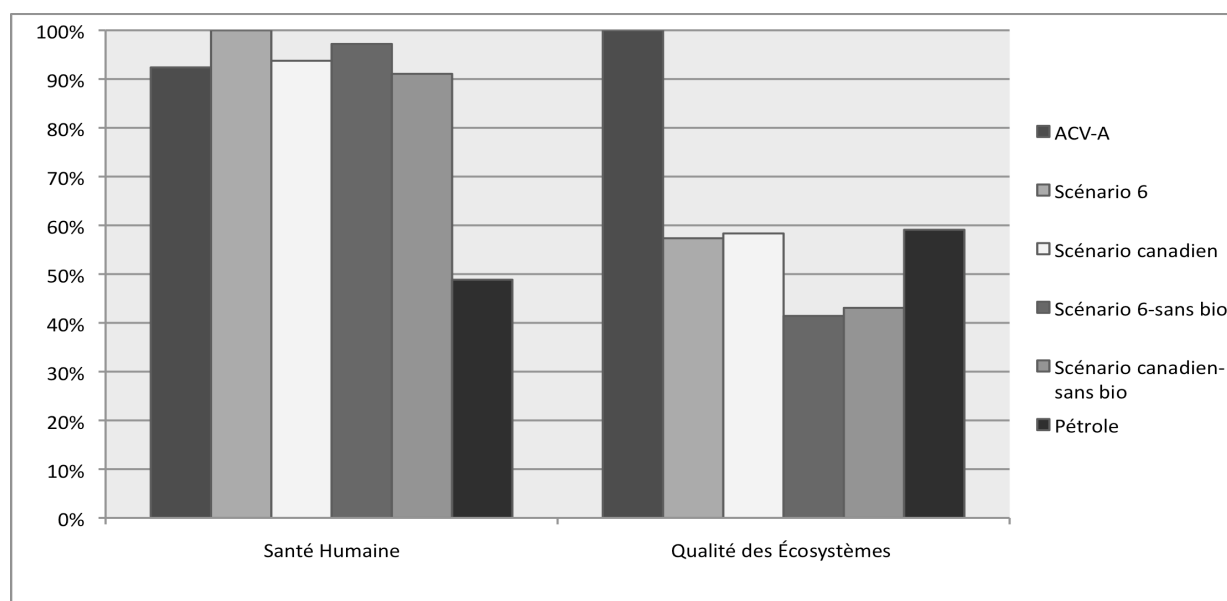


Figure 3-15 : Nouveaux résultats ACV-C sans la biorémédiation du maïs

Comme pour l'ACV-A, les impacts des catégories changement climatique et ressources ne varient évidemment pas lorsque la biorémédiation n'est plus prise en compte. En revanche, il est très intéressant d'observer, les différences obtenues pour la qualité des écosystèmes. Lorsque la biorémédiation est incluse dans le processus de culture, les impacts sur la qualité des écosystèmes du processus de culture lui-même sont inférieurs à ceux du processus sans la biorémédiation (idem pour la santé humaine, mais ampleur plus faible). Lors de l'extension des

frontières, les impacts de la culture de maïs déplacée au Canada (et donc manquante) sont enlevés du cycle de vie. De plus, comme il a été souvent discuté dans le mémoire, cette culture n'est pas entièrement remplacée par d'autres cultures, mais parfois la production est augmentée par ajout de fertilisants. Si la culture du maïs a plus d'impacts sur la qualité des écosystèmes car elle ne capte pas les métaux du sol, la déduire fait nettement diminuer le score de dommage qualité des écosystèmes. Ce même phénomène explique aussi la légère baisse dans les impacts sur la santé humaine.

Il est intéressant de constater que l'exclusion de la biorémédiation creuse encore plus la différence ACV-A/ACV-C. Elle renforce même le fait que le E85 à base de saule, lorsque les effets du changement d'utilisation des terres sont intégrés à l'analyse, devient nettement plus intéressant que le système de produits essence pour la qualité des écosystèmes. Cependant le scénario sans biorémédiation est ici simplifié. C'est un mécanisme plus complexe qui devrait être pris en compte pour réellement adapter ce processus de culture et non pas seulement annuler les flux sortants négatifs de ces quatre métaux. Ainsi, ce paramètre est sensible sur les résultats. En revanche, les conclusions ne sont pas inversées. Il est tout de même important de préciser, qu'une totale exclusion de cette capacité, que ce soit pour le saule ou le maïs, est tout de même contestable. Ainsi, des résultats intermédiaires seraient attendus. En effet, les résultats de l'ACV-A de l'E85 saule, seraient alors un peu diminués en santé humaine et qualité des écosystèmes, et lors de l'extension des frontières, la différence ACV-A/ACV-C serait moins creusée. Cependant de tels résultats sont pour l'instant difficiles à quantifier.

### **3.4.7 La formule pour le ratio production locale / importation**

Quand on applique les recommandations de Schmidt, on en vient à devoir utiliser des valeurs d'élasticités des prix pour calculer le ratio entre une augmentation de la production dans le pays même où a lieu la demande et des importations. Comme il a été discuté à la section 2.2.4, les modèles représentant l'économie du maïs aux États-Unis sont complexes et non linéaires. Les données d'élasticités sur la demande et l'offre pour le maïs aux États-Unis ne sont pas calculées et mises en ligne comme le sont celles d'autres pays. Ainsi une formule, basée sur les estimations d'offre et de demande disponibles pour les États-Unis (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b), a été proposée. Cette formule, bien que se basant sur les définitions des termes élasticités des prix sur l'offre et la demande, diffère de la formule de Schmidt. Pour la première

boucle de calcul, le ratio entre le Canada et les États-Unis a été calculé par la formule de Schmidt, la deuxième formule servant alors pour le ratio États-Unis/Chine de la deuxième boucle.

Afin de tester cette nouvelle formule, le premier ratio est recalculé en prenant les valeurs d'offre et de stocks finaux pour le maïs au Canada en 2007 et 2008 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). Alors que nous avons obtenu un ratio de 78,8% pour la part canadienne de l'augmentation par le calcul de la méthode de Schmidt, le ratio calculé de nouveau par la seconde formule devient 82,3% pour le Canada. En considérant ce nouveau ratio, les impacts sont recalculés suite à la mise à l'échelle des processus affectés en conséquence. Les nouveaux résultats diffèrent très peu, atteignant une différence maximale de +2,5% pour la santé humaine.

Néanmoins, la validité de cette nouvelle formule est discutable car elle est une version simplifiée de relations complexes. Elle se base aussi sur deux hypothèses très simplistes : des marchés parfaits où l'offre équivaut à la demande, et une offre et une demande élastiques. Tout d'abord, elle semble très simplificatrice et on peut douter de la pertinence de calculer un ratio entre les différences de variations. En considérant la demande et l'offre élastiques, la variation de l'offre devrait suivre la variation de la demande. Ainsi, pour cette étude il est supposé que si la variation de l'offre n'a pas suivi celle de la demande l'année précédente, une partie de notre nouvelle demande en 2009 ne sera pas comblée. Une importation sera donc supposée nécessaire. Le ratio est donc calculé ici sur une variation entre 2007 et 2008, ce qui semble court. En agriculture les tendances varient beaucoup. Ainsi grâce aux données disponibles sur la FAPRI, on remarque que, même si la tendance générale de l'offre et la demande est croissante, certaines années subissent des chutes de l'offre assez importantes (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). Il suffit de mauvaises conditions météo pour que les productions soient mauvaises et perturbent alors l'offre de cette année. Ainsi il est difficile d'extrapoler les tendances d'une année sur l'autre. Il faudrait donc étudier des variations sur de plus longues périodes. Néanmoins ces variations subissent des changements drastiques, les valeurs de ce r, présentées au Tableau 3-5 varient donc beaucoup.

Tableau 3-5 : Valeurs du r américain sur différentes périodes

<b>Période</b>	<b>r</b>
Entre 2008 et 2007	0,81
Entre 2008 et 2006	1,61
Entre 2008 et 2005	0,72
Entre 2008 et 2003	1,46
Entre 2008 et 1998	0,99

Ainsi les valeurs diffèrent nettement en fonction de la période de temps considérée. Il est possible de remarquer qu'entre 2006 et 2008 la variation de l'offre a été au final plus grande que celle de la demande. Cette même remarque est valable aussi si une période de 5 ans est considérée. En regardant les données de la FAPRI, il apparaît que les années 2004 et 2006 aient été difficiles (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). Il semble ainsi difficile de conclure sur la période à considérer pour le calcul du r. Ainsi dans cette étude, c'est la tendance observée sur l'année précédente et non une valeur moyenne qui a été conservée, supposant alors qu'à moins de problèmes majeurs cette tendance serait répétée l'année suivante.

### 3.4.8 Les hypothèses sur le transport

Les distances de transport, utiles dans les scénarios où il y a des importations sont choisies arbitrairement. Ainsi le maïs en provenance des États-Unis parcourt 1000 km en train. Le maïs venant de Chine vient en bateau puis arrive au Canada également par train. Afin de tester la validité des hypothèses sur le paramètre « distance de transport », plusieurs distances parcourues en train sont testées. La plage de valeur s'étend de 500 km à 2500 km. De même 200 km additionnels en camion sont aussi ajoutés. Il en résulte que la distance n'est pas un paramètre sensible, les résultats d'impacts ne changeant que jusqu'à +2% dans le pire des cas.

### 3.4.9 Récapitulatif des analyses de sensibilité

Le Tableau 3-6 ci-dessous récapitule les analyses de sensibilité réalisées.

Tableau 3-6 : Récapitulatif des analyses de sensibilité

Paramètre clé	Valeur initiale	Variation (ou valeur modifiée)	Sensibilité
<b>Consommation</b>			
Consommations des flex-fuel	Tirées publication	Diminution de 20%	S
<b>Culture saule</b>			
Modélisation de la culture	Données primaires	Banque Jungbluth	S+
Phytoremédiation	Avec (données littérature)	Sans (données littérature)	S
<b>Évaluation des impacts</b>			
Méthode d'EICV	IMPACT 2002+	ReCiPe	S+
<b>Imputation</b>			
Processus de conversion bois-éthanol 95%	Imputation économique	Extension des frontières	NS
<b>Culture maïs</b>			
Processus Canadien estimé	Adaptation au rendement canadien	Même rendement, même processus que USA	S
Biorémédiation du maïs	Avec	Sans	S
<b>Ratio production locale importation</b>			
Ratio Canada/USA	Schmidt	Méthode estimations FAPRI	NS
<b>Transport</b>			
Transport train USA	1000 km	[500km : 2000 km]	NS
Transport + camion	1000 km sans camion	200 km camion sup.	NS

La sensibilité est classée suivant trois catégories : non sensible (NS), sensible (S) si environ 10% de changement est observé ou même de très sensible (S+) si au moins deux catégories ont des différences de plus 10% ou alors si certaines conclusions se voient inversées.

## CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce chapitre propose une discussion sur le travail effectué tout au long de ce projet. La discussion commence par une critique de la méthode de Schmidt et débouche sur les choix méthodologiques en ACV-C en général.

### 4.1 La méthode de Schmidt

La méthode de Schmidt a été utilisée comme un outil pour réaliser cette ACV-C. Cette approche apporte une nouvelle vision à l'étude des biocarburants avec des résultats intéressants. Afin de parvenir à des études toujours plus complètes et réalistes, il semble important d'ouvrir la discussion sur quelques points problématiques.

Tout d'abord, il y a le problème de la validité temporelle. D'après Schmidt, les scénarios testés seraient valables sur un horizon temps inférieur à 10 ans. Cependant, cette durée semble bien trop longue. En effet, les calculs se basent sur des estimations mises à jour annuellement (P. Westhoff, communication personnelle, 9 octobre 2009). Ainsi la validité se verrait être plutôt annuelle.

De plus, même si la méthode a été suivie, il est important de vérifier des paramètres supplémentaires pour les calculs. D'après ce travail, la Chine serait le pays exportateur des États-Unis dans le cadre du scénario adapté au contexte canadien. Cependant, même si pendant longtemps la Chine a été autosuffisante vis-à-vis de sa production de maïs, un risque de revirement se fait attendre (Economic Research Service USDA, 2004). De plus, en observant les estimations de la FAPRI, quant aux exportations chinoises à venir, 2010 semble être une année charnière où les exportations chinoises pourraient stopper. Au contraire, il semblerait que la Chine commencerait à importer du maïs américain (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b). Ce scénario est notamment discutable quant à sa longévité. Il semble encore valable pour 2009, mais il s'avère important de concevoir que seul un échange Canada/États-Unis serait réaliste. De plus, la formule estimée pour le calcul du  $r$  américain est elle aussi très contestable. Tout d'abord sa validité temporelle, évaluée ici à un an, est courte et reflète bien les problèmes de variations brutales observées pour l'offre. Elle permet d'évaluer la variation de l'offre par rapport à celle de la demande, mais c'est une vision très simplifiée. Ainsi, il est possible de questionner une telle approche : si la variation de l'offre locale (américaine) ne



suivait réellement pas la variation de la demande les États-Unis importeraient-ils vraiment pour combler la différence ? En observant les estimations de la FAPRI, pour les dernières années, il est possible de remarquer que les États-Unis importent peu de maïs. Les importations représentent à peine 0,1% de l'offre totale américaine en 2008. La validité et l'utilité de cette formule sont donc contestables. C'est pour ces deux raisons que le scénario 6 est gardé dans la comparaison finale. Cependant, toujours dans l'optique d'extension des frontières, si les États-Unis doivent faire face à une augmentation de la demande canadienne, ils ne pourraient pas répondre aux besoins de la Chine qui, elle, aurait importé. Le sens serait donc inversé puisque les États-Unis exporteraient le maïs. Le dernier scénario créé pourrait alors, de manière très simplifiée, être une première évaluation des impacts de la compensation chinoise en supposant une transformation accrue des terres. Tester ce scénario reste tout de même important puisqu'il est pour l'instant réaliste de l'envisager.

Un autre point discutable de cette méthode est le problème de la « valeur seuil ». En effet, même s'il est généralement admis que même une toute petite perturbation entraîne un impact, on peut douter que de si petites valeurs changeraient drastiquement la situation des marchés économiques mondiaux. De plus, dans cette étude, la situation des importations ou exportations ne change pas, elle ne fait que s'intensifier. Tout d'abord il est important de rappeler que le 0,179kg de maïs découle ici de l'unité fonctionnelle de l'analyse qui est « Parcourir 1 km en voiture ». En réalité 60 ha de saule ont commencé à être cultivés et la plantation devrait s'étendre. Seulement même ces quelques tonnes semblent peu face à une production nationale. De plus, chaque année, de nouveaux grains pour la plupart génétiquement modifiés font leur apparition et assurent de meilleurs rendements. Ainsi, chaque année, grâce à l'utilisation de ces nouveaux grains et à une meilleure gestion des engrais les cultures de maïs canadiennes produisent « naturellement » jusqu'à 2% de plus, soit 200 000 t d'ici 2010 (B. Legault, communication personnelle, 26 août 2009). La faible perturbation engendrée dans cette étude semble alors sans conséquence puisqu'elle pourrait être compensée sans mesures supplémentaires (pas de renforcement des importations par exemple). Cependant, ce maïs supplémentaire est utilisé et n'est pas juste stocké. En effet, depuis quelque temps le Canada a observé une baisse de demande de la part des producteurs porcins qui utilisaient auparavant une part des excédents de maïs. Le maïs supplémentaire est soit exporté ou alors utilisé dans une usine de conversion en éthanol (B. Legault, communication personnelle, 11 septembre 2009). Ainsi, cela confirme la principale

hypothèse que même une faible perturbation dans la demande, sans compensation, a des impacts, ne serait-ce que moins de maïs disponible pour l'éthanol ou pour les exportations.

Le problème du choix d'une unité fonctionnelle se pose aussi. Dans ce projet, l'unité fonctionnelle de la partie ACV-C est la même que pour l'ACV-A, « parcourir 1 km en voiture », qui est de faible ampleur. Bien que dans le cadre d'une ACV-A les flux découlant d'une petite UF sont simplement mis à l'échelle grâce à la linéarité de l'ACV-A, il est possible de discuter ce choix d'un kilomètre parcouru pour l'ACV-C. En effet la quantité de maïs déplacée est alors très faible. Les processus identifiés lors de l'utilisation de la méthode de Schmidt seraient les mêmes pour une valeur de maïs plus grande. En effet la méthode ne considère pas directement la quantité de maïs pour identifier les régions et les autres cultures. Néanmoins l'affectation de ces processus serait d'autant plus intensifiée et le problème de la valeur limite se rencontre de nouveau.

Dans cette étude la paille a été exclue. Cette paille ayant une valeur nutritionnelle, notamment pour le fourrage animalier, elle nécessite une boucle de calcul. Le manque de paille au Canada doit être comblé, les impacts directs et indirects alors engendrés doivent être pris en compte. Cela montre que l'ACV-C ici réalisée n'est que partielle, puisqu'une ACV-C qui prendrait en compte toutes les conséquences devrait également considérer les impacts indirects de la paille déplacée.

Une autre discussion importante est le rajout d'incertitudes lors de l'extension des frontières. Schmidt reconnaît que le fait de rajouter des processus suivant une méthode choisie donnera des résultats moins certains que ceux d'une ACV-A classique (Schmidt, 2008). Beaucoup d'hypothèses, de suppositions et de simplifications sont faites au long de ce travail. L'inclusion de plusieurs scénarios permet de mettre en évidence les différentes incertitudes présentes. Plusieurs possibilités sont ainsi évaluées. Les incertitudes ont bien souvent plusieurs origines en ACV et sont des points difficiles à traiter. Ce point ramène donc au choix entre les deux approches d'ACV, qui est discuté dans la section 4.3 suivante.

## **4.2 Les analyses de sensibilité effectuées**

Les analyses effectuées tout au long de ce projet, et qui sont récapitulées au Tableau 3-6 font ressortir quatre points importants. Tout d'abord il semble évident que la consommation des véhicules étudiés est un facteur influent dans une étude de carburant. Outre cette première

information, il est intéressant de constater la différence de résultats obtenus entre l'étude de l'équipe de Jungbluth et al. (2008) et celle-ci. Quand la phytoremédiation du saule est prise en compte, les résultats diffèrent manifestement. Cependant la prise en compte ou non de cette capacité est discutable, et il a été choisi de ne pas l'intégrer dans cette étude. C'est pourquoi une autre analyse vient vérifier les différences de résultats quand on ne considère pas non plus la biorémédiation du maïs, afin d'être pertinent avec l'hypothèse pour le saule. Le E85 maïs a alors plus d'impacts sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes puisque les métaux ne sont plus captés du sol par la céréale. Il est aussi intéressant de constater que les différences entre les nouveaux résultats obtenus par l'extension des frontières sont encore plus marquées avec ceux de l'ACV-A. Néanmoins, il semble drastique de ne considérer aucune biorémédiation, que ce soit pour le saule ou le maïs. Il faudrait parvenir à un compromis qui amènerait à des résultats intermédiaires. Il y a encore trop d'incertitudes pour pouvoir réellement se décider.

L'hypothèse sur le carbone biogénique est aussi vérifiée par une analyse de sensibilité. En adaptant la méthode d'ÉICV, IMPACT 2002+ pour qu'elle attribue des facteurs de caractérisation aux émissions biogéniques, les impacts des systèmes de produits sont de nouveau évalués. Bien que des différences soient constatées, il est difficile de conclure sur la validité de l'hypothèse, puisqu'il semble que les imputations économiques qui ont été faites dans les processus de production d'éthanol faussent les bilans de masse.

Suite à une autre analyse de sensibilité, il semble qu'il serait préférable d'utiliser des processus réellement adaptés à chaque pays, comme le montre l'exemple de la culture du maïs. Même si les conclusions ne sont pas vraiment inversées lorsque l'on fait varier ce processus, il est important, dans le souci de construire toujours une analyse la plus fidèle possible de la réalité, de considérer un maximum de processus clairement régionalisés.

Pour finir, il est avantageux de tester une autre méthode d'évaluation des impacts, afin de confirmer l'hypothèse du changement appréciable dans les résultats de l'analyse quand on a recours à une extension des frontières. D'autant plus que la nouvelle méthode d'ÉICV, ReCiPe, propose des facteurs de caractérisation pour la transformation des terres, point important de cette étude, qui éviterait alors de devoir compléter la méthode IMPACT 2002+.

### 4.3 ACV-A versus ACV-C

L'utilité de l'ACV pour analyser les impacts potentiels de tout nouveau carburant est reconnue depuis plusieurs années (Kaltschmitt et al., 1997). Cet outil a un potentiel incontestable pour évaluer les apports des biocarburants qui sont souvent sujets à de nombreuses polémiques (Petrou & Pappis, 2009). Face à ce genre de produits complexes, les analyses doivent être plus méticuleuses. En plus de la discussion sur la méthode choisie, cette étude ramène principalement le thème du choix entre une approche axée sur les attributs et sur les conséquences. Schmidt lui-même explique qu'il faudrait parvenir à balancer une étude plus réaliste, mais moins certaine (l'ACV-C) avec une étude ayant moins d'incertitudes, mais beaucoup moins complète (l'ACV-A) (Schmidt, 2008). Ce dernier opte cependant pour la même vision que Weidema, à savoir que le recours à l'extension des frontières est préférable si l'on souhaite des études réalistes (Weidema, 2003). Certains auteurs ne jugent pas pertinent de recourir à des collectes de données supplémentaires vu les incertitudes sur les résultats et le temps que nécessite le travail supplémentaire de collecte et d'identification des processus (Mathiesen et al., 2009). Pour d'autres auteurs, les résultats d'une extension de frontières sont plus valables et de telles analyses devraient alors être privilégiées (Andrae, 2006). Suite au travail présenté ici, les changements observés entre les résultats des deux approches laissent penser qu'il semble important d'élargir les frontières vu que les résultats changent nettement les tendances pour trois catégories d'impacts inversant même les résultats pour la catégorie qualité des écosystèmes, avec la méthode d'évaluation des impacts IMPACT2002+. Cette étude se raccorde aux principes déjà observés par Searchinger et al. (2008). Suite à leurs travaux ils avaient montré que l'utilisation d'éthanol de maïs, double les émissions de GES sur une période de 30 ans par rapport à l'utilisation d'essence. Il est intéressant de constater que dans l'étude présentée dans ce mémoire, les résultats de l'extension des frontières permettent de conclure que l'utilisation de E85, au contraire, permet de diminuer les émissions de GES. Ces différences peuvent avoir plusieurs origines. Il s'agit tout d'abord d'éthanol de maïs et non de saule. Les modèles utilisés ne sont pas les mêmes et Searchinger et al., considèrent plus de processus affectés, de régions et de produits déplacés puisqu'ils étudient aussi les effets sur les produits laitiers et les stocks. Le choix de l'UF de leur étude expliquerait aussi cette différence et rappelle le problème de la « valeur seuil » des processus identifiés par la méthode de Schmidt discuté au point 4.1. Searchinger et al., étudient les effets indirects sur l'utilisation des terres pour une augmentation de 56 milliards de litre de la

production d'éthanol de maïs aux Etats-Unis. Une telle UF semble engendrer plus d'effets globaux que 0,179 kg de maïs déplacé au Canada. Néanmoins, cette comparaison renforce l'idée que l'extension des frontières est nécessaire. Elle devrait être réalisée pour chaque étude de biocarburant car chacune est unique et les résultats peuvent être difficilement généralisés. Le choix d'une méthodologie adaptée reste une étape importante du recours à l'ACV. La méthode de Schmidt peut sembler beaucoup trop simpliste puisqu'elle essaye de mettre en lien physiques et mathématiques des relations économiques très complexes. Une approche utilisant alors des modèles macro économiques, soutenue par certains auteurs, semblerait préférable (Kloverpris et al., 2008). Ce genre de méthode reste néanmoins très exigeante en temps et ressources et semble au contraire trop complexe pour une première approche. Malgré toutes ces discussions, plusieurs auteurs s'accordent à dire qu'il faut tout de même prendre en compte les impacts indirects pour parvenir à des études plus intégrales et moins discutables des biocarburants (Panichelli & Gnansounou, 2008; Searchinger et al., 2008).

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude montre que recourir à une extension de frontières, et ceci même avec une méthode simplifiée, change la vision auparavant établie des analyses de biocarburants. La performance environnementale de l'E85 à base de saule sur la qualité des écosystèmes est manifestement améliorée lorsque ce produit est analysé suivant une approche axée sur les conséquences. Ainsi les deux objectifs de ce projet sont atteints. Les impacts potentiels d'un E85 à base de saule québécois sont évalués, et les apports de l'ACV-C démontrés. Les résultats de l'ACV-A nous ont montré que ce biocarburant est une alternative au pétrole envisageable si l'on souhaite réduire le changement climatique ou bien si l'on souhaite encourager la diminution de consommation de ressources. En revanche cet E85, ainsi que les deux autres E85 testés, sont plus dommageables pour la santé humaine, fait que d'autres études avait déjà affirmé (Jacobson, 2007). L'analyse des conséquences du changement d'utilisation du champ de culture québécois, nous montre que cet E85, bien que toujours plus dommageable que le pétrole sur la santé humaine, serait à privilégier également pour la préservation de la qualité des écosystèmes. La simplification de cette méthode la rend abordable pour une première approche. Il est important de signaler qu'elle peut s'utiliser assez rapidement une fois les calculs bien compris. En effet, alors que la compréhension de la méthode, la première collecte de données et les calculs de scénarios ont pris plusieurs semaines, le test de la seconde boucle États-Unis/Chine n'a demandé que quelques jours, la partie difficile ayant été de trouver une alternative à la formule de Schmidt pour le ratio États-Unis/Chine qui ne marchait pas dans le contexte américain.

Cependant, dans l'optique où cette méthode semble une première approche intéressante pour parvenir à des études de biocarburants plus complètes, quelques changements pourraient déjà minimiser les risques d'obtenir des résultats trop incertains.

Concernant la méthode de Schmidt en elle-même, il faudrait tout d'abord utiliser des processus de culture de céréales adaptés, construits avec des données de chaque pays. Relativement aux augmentations de rendements, les autres types de fertilisants comme le phosphore et la potasse ou encore l'irrigation, devraient être intégrés dans les boucles de calculs. Il serait favorable de prendre en compte les rotations de culture, et donc de tester plusieurs boucles quand la terre est occupée durant plusieurs années. Pour finir, pour des pays comme le Canada ou les États-Unis les calculs gagneraient à être régionalisés. Dans cette étude des valeurs

moyennes pour le Canada, aussi bien que pour les États-Unis sont utilisées, il serait intéressant et plus réaliste de chercher des valeurs par province ou état. Cela rajoute cependant des complexités pour modéliser les échanges nationaux ou internationaux et la collecte de données serait plus ardue. Enfin, la création d'un scénario adapté, en plus de l'étude des scénarios initiaux, permet de présenter un groupe de résultats et de limiter les incertitudes qui se sont ajoutées dans l'étude lors de l'identification de la technologie affectée. Cette nouvelle touche apportée à la méthode est recommandée pour les analyses à venir. Cependant, afin d'avoir un scénario encore plus pertinent, la formule représentant le ratio production locale/importation est à retravailler pour les pays où la formule proposée par Schmidt n'est pas applicable telle quelle.

Au sujet des Analyses de Cycle de Vie des biocarburants en général, le principal conseil est, bien entendu, de se servir d'un maximum de données primaires, notamment pour la culture de la biomasse, qui risque de varier en fonction des régions. Ces études sur les carburants mettent en scène de nombreux processus de production d'énergie, mais surtout de nombreux fertilisants et herbicides. De plus, le type d'occupation de la terre, ainsi que les transformations qui lui sont infligées ont une influence non négligeable. Il est alors très avantageux de tester une autre méthode d'évaluation des impacts, utilisant d'autres facteurs de caractérisation et n'attribuant donc pas forcément les mêmes impacts, pour vérifier les résultats et affirmer ou infirmer la conclusion.

Pour finir, ce projet s'inscrit dans une démarche d'amélioration méthodologique des analyses de biocarburants et soutient le fait que malgré les incertitudes additionnelles engendrées l'extension des frontières apporte un regard nouveau aux résultats. En ignorant une partie des impacts d'un système de produits, l'ACV-A semble moins incertaine que l'ACV-C mais sa pertinence environnementale est plus faible. L'hypothèse de cette étude, à savoir que le recours à l'ACV-C change nettement les résultats de l'analyse est donc vérifiée. Il serait aussi intéressant de choisir une autre UF, qui se voudrait plus globale, pour analyser les résultats de l'ACV-C sur une échelle plus réaliste. Si l'étude présentée ici ne se veut pas la plus complète, elle constitue tout de même un premier pas encourageant vers des analyses plus réalistes, même si de nombreux efforts et développements méthodologiques sont encore indispensables pour pallier le problème des incertitudes.

## RÉFÉRENCES

- Adler, A., Dimitriou, I., Aronsson, P., Verwijst, T., & Weih, M. (2008). Wood fuel quality of two *Salix viminalis* stands fertilised with sludge, ash and sludge-ash mixtures. *Biomass and Bioenergy*, 32(10), 914-925.
- Andrae, A. (2006). Environmental Life Cycle Assessment in Microelectronics Packaging - Thesis for the degree of doctor of philosophy ISBN 91-7291-607-9, ISSN 0346-718X (2 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(3), 215-216.
- Argonne National laboratory. (2007). The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model. Consulté le 12 juin 2009, tiré de [http://www.transportation.anl.gov/modeling\\_simulation/GREET/](http://www.transportation.anl.gov/modeling_simulation/GREET/).
- Ballerini, D. (2006). *Les biocarburants : État des lieux, perspectives et enjeux du développement* (Éditions Technip, 1<sup>e</sup> éd.). Paris.
- Biofuel. (2009). History of biofuels. Consulté le 22 mai 2008, tiré de <http://biofuel.org.uk/history-of-biofuels.html>.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. (2008). *La production d'éthanol à partir de la matière lignocellulosique*: Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.
- Confédération suisse. (2009). Le biocarburant utilisé comme carburant. Consulté le 29/12/2009, tiré de <http://www.efd.admin.ch/dokumentation/medieninformationen/00467/index.html?lang=fr&msg-id=19504>.
- Crutzen, P. J., Mosier, A. R., Smith, K. A., & Winiwarter, W. (2008). N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. 7.
- Demirbas, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2106-2116.
- Economic Research Service USDA. (2004). *Is China's corn market at a turning point ?* : United States Department of Agriculture, .
- Ekvall, T., & Weidema, B. (2004). System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3), 161-171.
- Food and Agricultural Policy Research Institute. (2009a). Elasticity database. Consulté le 15 Avril 2009, tiré de <http://www.fapri.iastate.edu/tools/elasticity.aspx>.
- Food and Agricultural Policy Research Institute. (2009b). U.S and world agricultural outlook database. Consulté le 15 Avril 2009, tiré de <http://www.fapri.iastate.edu/tools/outlook.aspx>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). Fertilizer Use Statistics. Consulté le 20 Avril 2009, tiré de [http://www.fao.org/ag/agl/fertistat/fst\\_fubc\\_en.asp](http://www.fao.org/ag/agl/fertistat/fst_fubc_en.asp).



- Global Trade Analysis Project. (2009). Models : GTAP Models. Consulté le 5 septembre 2009, tiré de <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2009). *Recipe 2008*.
- Graham, L. A., Belisle, S. L., & Baas, C.-L. (2008). Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. *Atmospheric Environment*, 42(19), 4498-4516.
- Guinée. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment : Operational Guide to the ISO Standards. 7, 708.
- Gustavsson, L., Borjesson, P., Johansson, B., & Svanen, P. (1995). Reducing CO2 emissions by substituting biomass for fossil fuels. *Energy*, 20, 1097-1113.
- Heller, M. C., Keoleian, G. A., & Volk, T. A. (2003). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass and Bioenergy*, 25(2), 147-165.
- Hipple, P. C., & Duffy, M. D. (2002). Farmer's motivations for adoption of switchgrass. *Trends in New Crops and New Uses*, 252-266.
- IFP. (2008). Consulté le <http://www.ifp.fr/espace-decouverte-mieux-comprendre-les-enjeux-energetiques/tous-les-zooms/quel-avenir-pour-les-biocarburants-dits-de-2e-generation>.
- Iogen Corporation. (2008). Cellulosic ethanol. Consulté le 10 septembre 2008, tiré de [http://www.iogen.ca/cellulosic\\_ethanol/what\\_is\\_ethanol/process.html](http://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/what_is_ethanol/process.html).
- ISO 14040. (2006). Environmental management - life cycle assessment - principles and framework.
- ISO 14044. (2006). Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines.
- Jacobson, M. Z. (2007). Effects of Ethanol (E85) versus Gasoline Vehicles on Cancer and Mortality in the United States. *Environmental Science & Technology*, 41(11), 4150-4157.
- Johansson, B. (1996). Transportation fuels from Swedish biomass -- environmental and cost aspects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1(1), 47-62.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., et al. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324-330.
- Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (Eds.). (2005). *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan*.
- Jungbluth, N., Busser, S., Frischknecht, R., & Tuchschnid, M. (2008). Life cycle assessment of biomass-to-liquid fuels (pp. 35).
- Kaltschmitt, M., Reinhardt, G. A., & Stelzer, T. (1997). Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects. *Biomass and Bioenergy*, 12(2), 121-134.
- Keoleian, G., & Volk, T. (2005). Renewable Energy from Willow Biomass Crops: Life Cycle Energy, Environmental and Economic Performance. 22.

- Kloverpris, J., Wenzel, H., & Nielsen, P. (2008). Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(1), 13-21.
- Koh, L. P., & Ghazoul, J. (2008). Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological Conservation*, 141(10), 2450-2460.
- Kopp, R. F., Smart, L. B., Maynard, C. A., Isebrands, J. G., Tuskan, G. A., & Abrahamson, L. P. (2001). The Development of improved willow clones for eastern North America. *Forestry chronicle*. Vol. 77, no. 2 (Mar./Apr. 2001):p. 287-292, 6.
- Kuzovkina, Y. A., & Quigley, M. F. (2005). Willows Beyond Wetlands: Uses of Salix L. Species for Environmental Projects. *Water, Air, & Soil Pollution*, 162(1), 183-204.
- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (2001). Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar nutrient status of two willow species grown under SRIC in southern Quebec (Canada). *Forest Ecology and Management*, 150(3), 223-239.
- Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (2005). Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy*, 29(1), 1-9.
- Labrecque, M., Teodorescu, T. I., & Daigle, S. (1997). Biomass productivity and wood energy of Salix species after 2 years growth in SRIC fertilized with wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy*, 12(6), 409-417.
- Lamrani, S. (2008). Biocarburants et crise alimentaire Consulté le 18 juin 2008, tiré de <http://www.mondialisation.ca/index.php?context=va&aid=8765>.
- Le Monde. (2008). Le président brésilien, Lula, plaide en faveur des biocarburants.
- Lesage, P., Deschênes, L., & Samson, R. (2007). Evaluating Holistic Environmental Consequences of Brownfield Management Options Using Consequential Life Cycle Assessment for Different Perspectives. *Environmental Management*, 40(2), 323-337.
- Lorne, D. (2007). *Les unités pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde*: IFP Innovation, Énergie, Environnement.
- Lundie, S., Ciroth, A., & Huppés, G. (2007). *Inventory methods in LCA: towards consistency and improvement*: UNEP-SETAC.
- Mathiesen, B. V., Munster, M., & Fruergaard, T. (2009). Uncertainties related to the identification of the marginal energy technology in consequential life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 17(15), 1331-1338.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46.
- Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. (2005). *Étude sur le coût de production des céréales, du maïs grain et des oléagineux en 2005 au Québec*
- National Agricultural Statistics Service USDA. (2009). Data and statistics. Consulté le 17 août 2009, tiré de Quick stats, [http://www.nass.usda.gov/Data\\_and\\_Statistics/Quick\\_Stats/](http://www.nass.usda.gov/Data_and_Statistics/Quick_Stats/).

- Panichelli, L., & Gnansounou, E. (2008). Estimating greenhouse gas emissions from indirect land-use change in biofuels production: concepts and exploratory analysis for soybean-based biodiesel production. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 67, 1017 - 1030.
- Payet, J., & Gambazzi, F. (2008). *Assessing LCA and ERA for Sustainable site management in a single Framework*
- Petrou, E. C., & Pappis, C. P. (2009). Biofuels: A Survey on Pros and Cons. *Energy & Fuels*, 0(0).
- Plateforme biocarburant. (2009). La disponibilité des biocarburants en Suisse. Consulté le 20 octobre 2009, tiré de <http://www.plateforme-biocarburants.ch/infos/ch-disponibilite.php>.
- Ressources naturelles Canada. (2008). L'éthanol. Consulté le 26 mai 2008, tiré de <http://www.oeenr.gc.ca/transport/carburants/ethanol/ethanol.cfm?attr=8>.
- Sandén, B. A., & Karlström, M. (2007). Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 15(15), 1469-1481.
- Schmidt, J. (2008). System delimitation in agricultural consequential LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(4), 350-364.
- Schmidt, J., & Weidema, B. (2008). Shift in the marginal supply of vegetable oil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(3), 235-239.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., et al. (2008). Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319(5867), 1238-1240.
- Smart, L. B., & Cameron, K. D. (2008). Genetic Improvement of Willow (*Salix* spp.) as a Dedicated Bioenergy Crop. In *Genetic Improvement of Bioenergy Crops* (pp. 377-396).
- Technique Environnement et Économie Emmen. (2008). *Catalogue consommation 2008: TCS Emmen et Suisse* Energie Berne.
- Techno-Sciences. (2008). Biocarburant. Consulté le 20 mai 2008, tiré de <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1057>.
- Tillman, A.-M. (2000). Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(1), 113-123.
- Tilman, D., Socolow, R., Foley, J. A., Hill, J., Larson, E., Lynd, L., et al. (2009). Beneficial Biofuels--The Food, Energy, and Environment Trilemma. *Science*, 325(5938), 270-271.
- U.S Department of energy. (2007). DOE Selects Six Cellulosic Ethanol Plants for Up to \$385 Million in Federal Funding (22/01/2009). tiré de <http://www.energy.gov/news/4827.htm>.
- US EPA. (2009). *Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program* U.S Environmental Protection Agency.
- Weidema, B. (2003). Market information in Life Cycle Assessment. 147.
- Weidema, B., Frees, N., & Nielsen, A.-M. (1999). Marginal production technologies for life cycle inventories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(1), 48-56.

- Witters, N., Van Slycken, S., Ruttens, A., Adriaensen, K., Meers, E., Meiresonne, L., et al. (2009). Short-Rotation Coppice of Willow for Phytoremediation of a Metal-Contaminated Agricultural Area: A Sustainability Assessment. *BioEnergy Research*, 2(3), 144-152.
- Zhi Fu, G., Chan, W. A., & Minns, E. D. (2003). Life Cycle Assessment of Bio-ethanol Derived from Cellulose. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5.

## ANNEXE I – Processus

Tableau A.I-1 : Processus cycle de vie essence

<u>Adapté de</u>			
Operation, passenger car, petrol, EURO3 / CHU			
<u>Étapes</u>	<u>Processus</u>	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
<b>Production</b>	Petrol, low-sulphur, at regional storage / CHU	0,060339	kg
<b>Utilisation</b>	Operation, passenger car, petrol, EURO3 / CHU - juste émissions	1	km

Tableau A.I-2 : Processus du système de produits E85 maïs

<u>Adapté de</u>			
Operation, passenger car, ethanol US 85% / CHU			
<u>Étapes</u>	<u>Processus</u>	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
<b>Culture</b>	<b>culture maïs</b>	0,09894	p
construit avec	Corn, at farm /US U	3,227	kg
<b>Production éthanol</b>	<b>1 kg éthanol maïs</b>	0,09894	kg
construit avec	Ethanol, 95% in H2O, from corn, at distillery /US U-juste production	1,0005	kg
	Ethanol, 99,7% in H2O from biomass, at distillation /US-U-transformation	1,0005	kg
	Ethanol, 99,7% in H2O, from biomass,production US, at service-station /US-U-transport seulement	1	kg
<b>Production pétrole</b>	Petrol, low-sulphur, at regional storage /CHU	0,0163	kg
<b>Utilisation</b>	Operation, passenger car, ethanol US 85% /CHU-juste émissions	1	km

Tableau A.I-3 : Processus du système de produits E85 canne à sucre

<b><u>Adapté de</u></b>			
Operation, passenger car, ethanol Br 85% / CHU			
<b><u>Étapes</u></b>	<b><u>Processus</u></b>	<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Culture</b>	<b>culture canne à sucre</b>	0,09894	p
construit avec	Sugar cane, at farm /Br U	14,4025	kg
<b>Production éthanol</b>	<b>1 kg éthanol canne à sucre Br</b>	0,09894	kg
construit avec	Ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant /BR U-juste production	0,830415	kg
	Ethanol, 95% in H2O, from sugar cane molasses, at sugar refinery /BR U-juste production	0,170085	kg
	Ethanol, 99,7% in H2O from biomass, at distillation /US-U-transformation	1,0005	kg
	Ethanol, 99,7% in H2O, from biomass, production US, at service-station /US-U-transport seulement	1	kg
<b>Production pétrole</b>	Petrol, low-sulphur, at regional storage /CHU	0,0163	kg
<b>Utilisation</b>	Operation, passenger car, ethanol Br 85% /CHU-juste émissions	1	km

Tableau A.I-4 : Cycle de vie E85 saule

<b><u>Étapes</u></b>	<b><u>Processus</u></b>	<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Culture</b>	Impact de la culture-scénario E85	1	p
	Culture (1 ha-22 ans)	0,3822	kg
<b>Transport</b>	Transport du bois jusque distillerie-scénario E85	1	p
<b>Production d'éthanol</b>	Impact production éthanol 95%-scénario E85	1	p
	Impact transformation en éthanol 99,7%-scénario E85	1	p
	Transport de l'éthanol jusque station service-scénario E85	1	p
<b>Production du pétrole</b>	Impact du pétrole dans l'E85	1	p
<b>Utilisation</b>	Impact de l'utilisation pour 1 km-émissions seulement	1	p

Les processus qui suivent correspondent aux processus utilisés pour la modélisation du cycle de vie du E85 à base d'éthanol cellulosique de saule québécois.

Tableau A.I-5 : Processus pour l'étape de culture du saule

<b>Construction du processus</b>		<b>Quantité</b>	<b>Unité</b>
<b>Culture (1 ha - 22 ans)</b>		344000	kg
<b>Étapes</b>	<b>Processus</b>	<b>Quantité</b>	<b>Unité</b>
1.1	<b>Préparation du terrain</b>	1	p
1.1.1	<b>Fertilisants et autres produits</b>	1	p
1.1.1.1	<b>Production de fertilisants pour 1 ha</b>		
	Triazine-coumpounds, at regional storehouse /RER U	2,5	kg
	Glyphosate, at regional storehouse /RER U	2,5	kg
	Pesticide unspecified, at regional storehouse /RER U	7,5	kg
1.1.1.2	<b>Transport des fertilisants</b>		
	Transport, lorry 3,5-16t, fleet average /RER U	0,15	tkm
émissions vers le sol	Glyphosate	2,5	kg
	Napropamide	7,5	kg
	Simazine	2,5	kg
1.1.2	<b>Machinerie (diesel)</b>	1	p
	Diesel, used by tractor / RER U	28,76407506	kg
1.2	<b>Plantation (entre 17000 et 20000 plants/ha)</b>	1	p
	Diesel, used by tractor / RER U	25,14387335	kg
	Diesel, used by tractor / RER U	7,078944557	kg
1.3	<b>Pemièrre taille</b>	1	p
	Diesel, used by tractor / RER U	7,483455675	kg
1.4	<b>Première fertilisation (lisier)</b>	1	p
	Diesel, used by tractor / RER U	57,49484238	kg
	Diesel, used by tractor / RER U	3,928730237	kg
émissions vers l'air	Nitrogen dioxide	9,31	kg
	Ammonia	65,37	kg
	Dinitrogen monoxide	5,4	kg
1.5	<b>Première récolte</b>	1	p
	Diesel, used by tractor / RER U	115,2452174	kg
1.6	<b>Récolte</b>	6	p
	Diesel, used by tractor / RER U	130,9604743	kg
1.7	<b>Fertilisation</b>	6	p
	Diesel, used by tractor / RER U	57,49484238	kg
	Nitrogen dioxide	9,31	kg
	Ammonia	65,37	kg
	Dinitrogen monoxide	5,4	kg
	<b>Bouture-1ha-7000000 boutures</b>	17000	p
	Diesel, used by tractor / RER U	982,095252	kg

	Fertilisants et autres produits	1	p
1.0	<b>Transformation</b>		
	Transformation, from arable	10000	m <sup>2</sup>
	Transformation, to forest, intensive, short cycle	10000	m <sup>2</sup>
1.0	<b>Occupation</b>		
	Occupation, forest, intensive, short cycle	10000	m <sup>2</sup>

Tableau A.I-6 : Processus de l'étape transport du bois

<u>Étapes</u>	Construction du processus	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
	Transport du bois jusque distillerie-scénario E85	1	p
	<u>Processus</u>	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
<b>Transport</b>	Transport, lorry 20-28t, fleet average /CH U	0,023034	tkm
	Transport, tractor and trailer /CH U	0,003839	tkm

Tableau A.I-7 : Processus pour l'étape de production d'éthanol 95%

<u>Étapes</u>	Construction du processus	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
	Impact production éthanol 95%-scénario E85	1	p
	<u>Processus</u>	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
<b>Production éthanol 1ère partie</b>	Ethanol, 95% in H <sub>2</sub> O, from wood plantations-Quebec Willow, at distillery / CH U - Final (juste production)	0,09943	kg

Tableau A.I-8 : Processus de l'étape de transformation en éthanol 99,7%

<u>Étapes</u>	Construction du processus	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
	Impact transformation en éthanol 99,7%-scénario E85	1	p
	<u>Processus</u>	<u>Quantité</u>	<u>Unité</u>
<b>Production éthanol 2ème partie</b>	Ethanol, 99,7% in H <sub>2</sub> O, from biomass, at distillation /RER U Wood plantations-juste transformation	0,09943	kg



Tableau A.I-9 : Processus de l'étape de transport jusqu'à la station service

<b>Construction du processus</b>		<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Transport de l'éthanol jusque station service- scénario E85</b>		1	p
<b><u>Étapes</u></b>	<b><u>Processus</u></b>	<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Production éthanol 3ème partie</b>	Ethanol, 99,7% in H2O, from biomass, production RER, at service station /CH U Wood plantations-sans production	0,09943	kg

Tableau A.I-10 : Processus de l'étape pétrole

<b>Construction du processus</b>		<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Impact du pétrole dans l'E85</b>		1	p
<b><u>Étapes</u></b>	<b><u>Processus</u></b>	<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Production pétrole</b>	Petrol, low-sulphur, at regional storage /CHU	0,0163	kg

Tableau A.I-11 : Processus de l'étape d'utilisation

<b>Construction du processus</b>		<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Impact de l'utilisation pour 1 km-scénario E85 émissions seulement</b>		1	p
<b><u>Étapes</u></b>	<b><u>Processus</u></b>	<b><u>Quantité</u></b>	<b><u>Unité</u></b>
<b>Production pétrole</b>	Operation, passenger car, ethanol wood plantations 85% /CH U-seulement émissions	1	km

## ANNEXE II – Détails sur les calculs des six scénarios

Tableau A.II-1 : Récapitulatif des six scénarios de Schmidt (adapté de Schmidt, 2008)

<u>Scénarios</u>	<u>Description</u>
<b>1</b>	Augmentation par surface région A
<b>2</b>	Augmentation du rendement région A
<b>3</b>	Augmentation aux dépens d'autres cultures (Y)
<b>4</b>	Augmentation par importation région B et par surface
<b>5</b>	Augmentation par importation région B et par rendement
<b>6</b>	Augmentation dans la région A et par importation (élasticité des prix)

**Flux étudié : manque de 0,179 kg de maïs au Canada**

### **Scénario 1 : augmentation de la production dans la région A par surface**

#### Données de l'utilisateur :

- Quantité de céréale X : le maïs
- Année de l'étude : 2009
- Région A : Canada

#### Données nécessaires aux calculs :

- Rendement pour la culture X et l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

Calculs :

Grâce au rendement fourni pour l'année en cours (kg X/ha), le calcul donne la surface supplémentaire nécessaire pour faire pousser cette quantité de X demandée (kg X) dans le cas d'une augmentation par surface.

Résultat : en ha de surface arable supplémentaire**Scénario 2: augmentation de la production au Canada par ajout d'engrais**Données de l'utilisateur :

- Quantité de céréale X : le maïs
- Année de l'étude : 2009
- Région A : Canada

Données nécessaires aux calculs :

- Rendement pour la culture X et l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Taux d'application d'engrais dans la région A en fonction de la céréale (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009)
- Prévisions d'augmentation du rendement de la culture X dans la région A en kg supplémentaire produit/ha d'ici 2018 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009)
- Réponse à l'ajout de fertilisants (Schmidt, 2008)

Hypothèses posées et source :

- Hypothèse principale de ce scénario : seul l'ajout de N est considéré
- Seule une augmentation par ajout d'engrais est considérée : on suppose alors que les estimations d'augmentation du rendement d'ici 2018 correspondent à des ajouts de N

Calculs :

Plusieurs calculs sont nécessaires pour ce scénario :

1. L'augmentation attendue de rendement d'ici 2018 (kg X supplémentaire/ha) est calculée
2. Grâce aux valeurs de taux d'application de N dans la région A à l'année considérée (kg N/ha) et aux données sur la réponse du maïs à un ajout supplémentaire de fertilisants (kg X sup / kg N sup) l'augmentation de production espérée en vue de l'application de N (kg N/ha) est calculée. Vu l'augmentation attendue de rendement d'ici 2018 la quantité de N à ajouter pour atteindre un tel rendement est déduite (kg N).
3. La surface utilisée par la culture dans l'année considérée est calculée (par le rendement de cette même année) est calculée (ha).
4. Connaissant la surface (ha) et la concentration de N (kg N/ha) à ajouter par surface pour atteindre la nouvelle production la quantité de N à ajouter sur cette surface est déterminée (kg N).

Résultat : en kg de N ajouté**Scénario 3: augmentation de la production au Canada par surface, atteignant une autre culture****Point clef de ce scénario : identification de la culture affectée par un besoin de surface supplémentaire**Données de l'utilisateur :

- Quantité de céréale X : le maïs
- Année de l'étude : 2009
- Région A : Canada

Processus affectés à identifier :

- Culture Y (déplacée)
- Région B : région d'où on va faire venir la culture Y

### Hypothèses posées :

- Hypothèse principale de ce scénario : orge assumée comme culture affectée
  - Pour l'Europe, Weidema l'avait identifiée comme culture ayant la marge bénéficiaire brute la plus faible (Weidema, 2003)
  - D'après les données sur les coûts de production (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2005) cette même hypothèse peut être conservée. Dans ce rapport l'orge apparaît comme la céréale procurant le moins de recette (ramené à la tonne produite) elle risque donc d'être affectée
- Hypothèse secondaire : la région d'où va provenir la culture Y
  - Weidema a identifié le Canada comme producteur marginal d'orge la même hypothèse sera alors conservée (Weidema, 2003)
- Pour la culture Y l'augmentation se fait-elle par rendement ou surface ?
  - D'après Richard Phillips (R. Phillips, communication personnelle, 10 août 2009), l'orge pousse d'une manière extensive au Canada (dans les prairies, peu d'entretien et irrigation par eau de pluie).  
Une extension par surface est alors considérée

### Données nécessaires aux calculs :

- Rendement pour la culture X et l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Marge bénéficiaire brute des céréales dans la région A (adaptée des données sur les coûts et prix de vente du rapport du ministère (Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2005) )
- Rendement de la culture Y pour l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

### Calculs :

Plusieurs calculs sont nécessaires pour ce scénario :

1. Calcul du déplacement de culture Y engendré : le rendement de X (kg X/ha) et la quantité nécessaire (kg X) nous donne la surface occupée (ha). Connaissant le rendement de la

culture Y (kg Y/ha) et la surface nouvellement transformée pour le maïs (ha), la quantité de Y manquante est déterminée (kg Y).

2. Avec le rendement de la culture Y (kg Y / ha B) dans la région B (ou même région comme dans ce cas au Canada) on en déduit la surface supplémentaire nécessaire à la culture de Y (ha B).

**Résultat : en ha supplémentaire de la culture Y**

#### **Scénario 4: augmentation de la production aux USA par surface**

**Point clef de ce scénario : identification du pays affecté d'où proviendra alors la quantité supplémentaire de la culture X**

Données de l'utilisateur :

- Quantité de céréale X : le maïs
- Année de l'étude : 2009
- Région A : Canada

Processus affectés à identifier :

- Région B : région d'importation de la céréale X

Hypothèses posées et source :

- Hypothèse principale de ce scénario :
  - Identification du pays d'importation en regardant les prévisions de croissance de production de la céréale X, le pays présentant la plus grande croissance en quantité produite d'ici 2018 (kg supplémentaire X d'ici 2018) aura tendance à subvenir au besoin d'un pays en manque puisque que ce pays est le plus apte à faire augmenter sa production pour répondre à une demande supplémentaire.

Données nécessaires aux calculs :

- Rendement pour la culture X et l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

- Données de production et estimations de l'évolution entre 2009 et 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
  - Les États –Unis vont faire face à la plus grande augmentation de production (en t produites) d'ici 2018 : pays importateurs (région B)
- Rendement pour la culture X et l'année considérée, mais dans la région B (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

Calculs :

Connaissant la quantité à importer (kg X) et le rendement (kg/ha B) dans la région B la surface nécessaire à la culture de cette quantité de céréale X dans la région B est calculée (ha B).

Résultat : en ha supplémentaire de culture X dans la région d'importation B

**Scénario 5: augmentation de la production aux USA par ajout d'engrais**

**Point clef de ce scénario : identification du pays affecté d'où proviendra alors la culture supplémentaire de la culture X**

Données de l'utilisateur :

- Quantité de céréale X : le maïs
- Année de l'étude : 2009
- Région A : Canada

Processus affectés à identifier :

- Région B : région d'où on va faire venir la culture X

Hypothèses posées et source :

- Hypothèse principale de ce scénario :
  - Identification du pays d'importation en regardant les prévisions de croissance de production de la céréale X, le pays présentant la plus grande croissance en quantité produite d'ici 2018 (kg supplémentaire X d'ici 2018) aura tendance à subvenir au

besoin d'un pays en manque puisque que ce pays est le plus apte à faire augmenter sa production pour répondre à une demande supplémentaire.

- Seul l'ajout de N est considéré
- Seule une augmentation par ajout d'engrais est considérée on suppose alors que les estimations d'augmentation du rendement d'ici 2018 correspondent à des ajouts de N

#### Données nécessaires aux calculs :

- Rendement pour la culture X et l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Données de production et estimations jusque 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
  - Les États –Unis vont faire face à la plus grande augmentation de production (en t produites) d'ici 2018 : pays importateurs (région B)
- Rendement pour la culture X et l'année considérée, mais dans la région B (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Taux d'application d'engrais dans la région B en fonction de la céréale (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009)
- Prévisions augmentation du rendement de la culture X dans la région B en kg supplémentaire X/ha B d'ici 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Réponse à l'ajout de fertilisants (Schmidt, 2008)

#### Calculs :

Plusieurs calculs sont nécessaires pour ce scénario :

1. L'augmentation attendue de rendement d'ici 2018 dans la région B (kg X supplémentaire/ha B) est calculée
2. Grâce aux valeurs de taux d'application de N dans la région B à l'année considérée (kg N/ha B) et aux données sur la réponse du maïs à un ajout supplémentaire de fertilisants (kg X sup / kg N sup) l'augmentation de production espérée en vue de l'application de N



(kg N/ha) est calculée. Vu l'augmentation attendue de rendement d'ici 2018 la quantité de N à ajouter pour atteindre un tel rendement est déduite (kg N).

3. La surface utilisée par la culture dans l'année considérée est calculée (par le rendement de cette même année et la quantité de X à produire) est calculée (ha B).
4. Connaissant la surface (ha B) et la concentration de N (kg N/ha B) à ajouter par surface pour atteindre la nouvelle production la quantité de N à ajouter sur cette surface est déterminée (kg N).

**Résultat : en en kg de N ajouté sur la culture de céréale X de la région B**

### **Scénario 6 : augmentation de la production locale (région A) et importation (région B)**

#### **Étapes clef de ce scénario :**

- **Identifier les proportions produites localement ou importées (élasticité des prix)**
- **Identifier le pays d'origine des importations (région B)**
- **Calculer les proportions d'augmentation de la production par augmentation des surfaces cultivées ou par ajout d'engrais**

#### **Données de l'utilisateur :**

- Quantité de céréale X : le maïs
- Année de l'étude : 2009
- Région A : Canada

#### **Processus affectés à identifier :**

- Région B : région d'importation
- Proportion à déterminer

#### **Hypothèses posées et source :**

- Importance de la fonction de la céréale (nourriture humaine, animale ou autre), car détermine l'élasticité des prix d'offre et de demande qui seront par la suite utiles

- Identification du pays d'origine en regardant les prévisions de croissance de production de la céréale X, le pays présentant la plus grande croissance en quantité produite aura tendance à subvenir au besoin d'un pays en manque
- Pour les calculs d'élasticité des prix entre l'offre et la demande l'hypothèse que l'offre équivaut à la demande (marché parfait) est posée.
- Seul l'ajout de N est considéré pour augmenter la consommation d'engrais

#### Données nécessaires aux calculs :

- Rendement pour la culture X et l'année considérée (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Données de production et estimations jusqu'à 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
  - Les États –Unis vont faire face à la plus grande augmentation de production (en t produites) d'ici 2018 : pays importateurs (région B)
- Données d'élasticité des prix de l'offre et de la demande de la culture X par rapport à sa fonction (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009a)
- Prévisions d'augmentation de production, d'augmentation de la production par engrais et des surfaces cultivées pour la céréale X dans les régions A et B (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Rendement pour la culture X et l'année considérée dans la région A (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Taux d'application d'engrais dans la région A en fonction de la céréale (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009)
- Prévisions d'augmentation du rendement de la culture X dans la région A en kg supplémentaires produits/ha A d'ici 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)
- Réponse à l'ajout de fertilisants (Schmidt, 2008)
- Rendement pour la culture X et l'année considérée dans la région B (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

- Taux d'application d'engrais dans la région B en fonction de la céréale (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009)
- Prévisions d'augmentation du rendement de la culture X dans la région B en kg supplémentaires produits/ha B d'ici 2018 (Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

### Calculs :

Plusieurs calculs sont nécessaires pour ce scénario :

1. Tout d'abord il faut déterminer la proportion de la culture X qui va être produite localement. Schmidt propose la formule :

$$\Delta S = \Delta D * \eta S / \eta D$$

Avec  $\eta S$  élasticité des prix sur l'offre et  $\eta D$  sur la demande et  $\Delta D$  le changement dans la demande (la quantité de culture X manquante) et  $\Delta S$  le changement dans l'offre. Le ratio  $\Delta S$  va être attribué à la quantité produite localement. Le reste est donc importé.

2. Calcul des proportions par surface/par ajout d'engrais pour la culture X dans les régions A et B.
  - a. Augmentation totale : production année antérieure + augmentation par surface + augmentation de la production due au nouveau rendement
  - b. Proportion par surface : Augmentation de la superficie cultivée pour la céréale X par rapport année antérieure\* rendement année antérieure (à faire sur toutes les années du point de départ jusqu'à la fin des données de prévisions)  
Puis ce résultat divisé par l'augmentation totale donne le ratio par surface
  - c. Proportion par augmentation du rendement : Augmentation rendement par rapport année antérieure\* surface totale de l'année en question (à faire sur toutes les années du point de départ jusqu'à la fin des données de prévisions)  
Puis ce résultat divisé par l'augmentation totale donne le ratio par rendement
3. Calculs des quatre grandes quantités : la fraction de X produite dans la région A (puis proportion par surface et proportion par rendement) et idem région B

4. Calcul des nouvelles surfaces de culture supplémentaires dans les régions A et B et des quantités de N à ajouter :

a. Surfaces supplémentaires régions A et B (pour la partie par surface) :

Grâce au rendement fourni pour l'année en cours, la surface supplémentaire nécessaire (ha) pour faire pousser cette quantité de X demandée dans le cas d'une augmentation par surface est calculée

b. Ajout de N régions A et B (pour la partie par rendement) :

- i. Calcul de l'augmentation attendue de rendement d'ici 2018 en kg supplémentaires X/ha A ou B
- ii. Grâce aux valeurs de taux d'application de N dans la région A ou B à l'année considérée (kg N/ha A ou B) et aux données sur la réponse du maïs à un ajout supplémentaire de fertilisants (kg X sup / kg N sup) l'augmentation de production espérée en vue de l'application de N (kg N/ha A ou B) est calculée. Vu l'augmentation attendue de rendement d'ici 2018 la quantité de N à ajouter pour atteindre un tel rendement est déduite (kg N).
- iii. La surface utilisée par la culture dans l'année considérée est calculée (par le rendement de cette même année et la quantité de X à produire) est calculée (ha A ou B).
- iv. Connaissant la surface (ha A ou B) et la concentration de N (kg N/ha A ou B) à ajouter par surface pour atteindre la nouvelle production la quantité de N à ajouter sur cette surface est déterminée (kg N).

Résultats :

- en kg de N ajouté sur la culture de céréale X de la région A
- en ha supplémentaire cultivé dans la région A
- en kg de N ajouté sur la culture de céréale X dans la région B
- en ha supplémentaire cultivé dans la région B

### ANNEXE III – Données nécessaires pour les calculs des six scénarios

Tableau A.III-1 : Rendements attendus des productions de maïs (adapté de Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

Région A	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Évolution	
											%	t/ha
Africa	1,49	1,51	1,53	1,54	1,56	1,58	1,6	1,61	1,63	1,65	10,74 %	0,16
Algeria	1	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	4,00%	0,04
Argenti- na	7,19	7,26	7,33	7,4	7,48	7,55	7,62	7,69	7,76	7,83	8,90%	0,64
Asia	2,53	2,55	2,57	2,59	2,6	2,62	2,64	2,66	2,68	2,7	6,72%	0,17
Australia	5,74	5,76	5,78	5,8	5,82	5,84	5,86	5,88	5,9	5,92	3,14%	0,18
Brazil	3,87	3,9	3,95	3,98	4,02	4,06	4,1	4,14	4,18	4,22	9,04%	0,35
Canada	9,15	9,23	9,32	9,4	9,49	9,58	9,66	9,75	9,83	9,92	8,42%	0,77
China	5,49	5,55	5,61	5,67	5,73	5,79	5,85	5,91	5,97	6,03	9,84%	0,54
Eastern Europe	4,89	4,93	4,96	5	5,03	5,07	5,1	5,14	5,17	5,21	6,54%	0,32
Egypt	8,56	8,6	8,64	8,68	8,72	8,77	8,81	8,85	8,89	8,93	4,32%	0,37
Euro- pean Union	6,62	6,68	6,73	6,79	6,84	6,89	6,95	7	7,06	7,11	7,40%	0,49
Former Soviet Union	3,26	3,27	3,28	3,29	3,31	3,32	3,33	3,34	3,35	3,37	3,37%	0,11
India	2,19	2,21	2,23	2,24	2,26	2,28	2,3	2,32	2,34	2,36	7,76%	0,17
Indo- nesia	2,11	2,12	2,14	2,15	2,17	2,18	2,2	2,21	2,23	2,24	6,16%	0,13
Latin America	2,64	2,67	2,69	2,72	2,74	2,77	2,79	2,82	2,84	2,87	8,71%	0,23
Malaysia	3,59	3,61	3,63	3,65	3,67	3,69	3,71	3,73	3,76	3,78	5,29%	0,19
Mexico	3,19	3,21	3,23	3,25	3,26	3,28	3,3	3,32	3,34	3,35	5,02%	0,16
Middle East	6,02	6,05	6,09	6,13	6,17	6,21	6,25	6,28	6,32	6,36	5,65%	0,34
Pakistan	2,87	2,88	2,89	2,9	2,91	2,92	2,93	2,94	2,96	2,97	3,48%	0,1
Philip- pines	2,52	2,55	2,57	2,59	2,62	2,64	2,66	2,69	2,71	2,73	8,33%	0,21

Rest of World	2,79	2,82	2,85	2,88	2,91	2,94	2,97	3	3,02	3,05	<b>9,32%</b>	<b>0,26</b>
Russia	3,61	3,63	3,66	3,68	3,7	3,72	3,74	3,77	3,79	3,81	<b>5,54%</b>	<b>0,2</b>
South Africa	3,77	3,78	3,8	3,81	3,83	3,84	3,86	3,87	3,89	3,91	<b>3,71%</b>	<b>0,14</b>
South Korea	4,76	4,81	4,86	4,91	4,96	5,02	5,07	5,12	5,17	5,22	<b>9,66%</b>	<b>0,46</b>
Taiwan	5,04	5,07	5,11	5,14	5,18	5,21	5,25	5,29	5,32	5,36	<b>6,35%</b>	<b>0,32</b>
Thailand	4,04	4,09	4,15	4,21	4,26	4,32	4,37	4,43	4,49	4,54	<b>12,38%</b>	<b>0,5</b>
Ukraine	4,26	4,29	4,31	4,34	4,37	4,4	4,42	4,45	4,48	4,5	<b>5,63%</b>	<b>0,24</b>
US (domestic units)	155,91	158	160,05	161,93	163,91	165,9	168,03	170,27	172,32	174,3	<b>11,80%</b>	<b>18,39</b>
US (metric units)	9,79	9,92	10,05	10,16	10,29	10,41	10,55	10,69	10,82	10,94	<b>11,75%</b>	<b>1,15</b>
Vietnam	4,12	4,15	4,17	4,2	4,22	4,25	4,27	4,3	4,32	4,35	<b>5,58%</b>	<b>0,23</b>
World	5,04	5,11	5,17	5,23	5,29	5,35	5,41	5,47	5,53	5,58	<b>10,71%</b>	<b>0,54</b>

Tableau A.III-2 : Taux d'application de fertilisants (kg/ha) sur les cultures de maïs par pays  
(adapté de Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009)

Région	Superficie	Superficie %	Taux application à l'hectare		
			Taux N	Taux P	Taux K
Argentina (2002/2003):	3,057.0	85.0	28.0	19.0	0.0
Austria (1999/2000):	175.0		120.0	56.0	68.0
Azerbaijan (1998):	3.9		11.0	11.0	6.0
Belgium (1996):	35.0		65.0	30.0	40.0
Bangladesh (1998):	24.0		30.0	10.0	8.0
Bulgaria (1998):	539.0	12.3	1.0	0.0	0.0
Brazil (2002):	12,615.0		40.0	35.0	33.0
Canada (2000):	1,111.1		156.0	52.0	95.0
Switzerland (1999/2000):	29.0		160.0	80.0	119.0
Chile (1997):	120.0		200.0	100.0	30.0
China, Mainland (1997):	21,152.3		130.0	40.0	40.0
Colombia (1997):	597.0		50.0	70.0	10.0
Costa Rica (1997):	13.2	40.0	100.0	40.0	20.0
Czech Republic (2000):	11.0		83.0	22.0	24.0
Germany (1999/2000):	350.0		150.0	50.0	90.0
Dominican Republic (1998):	28.5	40.0	100.0	60.0	60.0
Ecuador (1995):	320.0	60.0	120.0	40.0	40.0
Egypt (1997):	814.3		233.2	35.7	0.0
Spain (1999/2000):	430.0		225.0	110.0	103.0
Ethiopia (1995):	1,100.0		6.8	13.6	0.0
France (1999/2000):	1,808.0		170.0	59.0	36.0
Guinea (1997):	84.7	40.0	80.0	60.0	40.0
Greece (1999/2000):	210.0		190.0	45.0	5.0
Guatemala (1997):	620.0		100.0	60.0	60.0
Honduras (1997):	453.2	60.0	100.0	50.0	80.0
Croatia (1999):	385.7		100.1	35.0	35.0
Hungary (1999/2000):	120.0		115.0	20.0	24.0
Indonesia (2001):	3,402.0	80.0	5.0	25.0	8.0
India (2003/2004):	6,600.0		41.7	14.7	3.8
Israel (1997):	20.0		250.0	80.0	200.0
Italy (1999/2000):	1,200.0		184.0	80.0	35.0
Japan (1998):	0.1		200.0	200.0	150.0
Kenya (1997):	1,500.0	30.0	40.0	30.0	0.0
Cambodia (2001):	90.0	20.0	25.0	15.0	0.0
Laos (2001):	10.0	40.0	50.0	25.0	0.0

Lebanon (1995):	2.1	70.0	80.0	50.0	40.0
Lithuania (1996):	59.0		16.0	6.0	10.0
Moldova, Republic of (1999):	87.0		1.1	0.0	0.0
Mexico (1998):	7,876.8	75.0	80.0	20.0	10.0
Myanmar (2001):	205.0	30.0	35.0	10.0	0.0
Malawi (1997):	1,233.5	30.0	60.0	15.0	2.0
Malaysia (2002):	7.5		91.6	40.1	7.9
Nigeria (1996):	4,203.0		5.9	1.4	0.0
Nicaragua (1998):	251.6	70.0	50.0	20.0	20.0
Netherlands (1999/2000):	20.0		44.0	30.0	20.0
New Zealand (2000):	20.0		120.0	136.0	90.0
Philippines (2001):	2,507.0	80.0	58.0	16.0	10.0
Poland (1999/2000/2001):	224.0		82.0	29.0	36.0
Korea, Dem People's Rep (1998/1999/2000):	496.0		58.0	12.0	11.0
Portugal (1999/2000):	190.0		160.0	60.0	55.0
Paraguay (1997):	384.1	30.0	30.0	30.0	30.0
El Salvador (1998/99):	295.1		76.0	33.0	0.0
Slovakia (1999/2000):	105.1		85.8	9.8	8.8
Syrian Arab Republic (1995):	69.0		35.0	30.0	0.0
Togo (1997):	422.8	20.0	35.0	15.0	10.0
Thailand (2001):	1,300.0	80.0	56.0	32.0	48.0
Turkey (1999):	676.0	97.0	128.7	32.4	5.0
Tanzania, United Rep of (1997):	1,564.0	10.0	80.0	40.0	5.0
Uruguay (1998):	60.3	50.0	40.0	60.0	10.0
United States of America (1998):	31,205.0		150.0	70.0	90.0
Venezuela, Boliv Rep of (1997):	423.6	80.0	100.0	40.0	30.0
Viet Nam (1999):	687.0	90.0	105.0	60.0	55.0
South Africa (2004):	3,354.0	95.0	55.0	30.0	6.0
Zambia (1996):	649.0		15.7	5.3	2.7
Zimbabwe (1998):	1,223.8	61.0	153.0	22.0	21.0



Tableau A.III-3 : Réponse à un ajout supplémentaire de fertilisants (adapté de Schmidt, 2008)

Culture	Pays	Quantité de N répandue (kg N/ha)			
		0-50	50-100	100-150	150-200
Maïs	USA-Oklahoma	56	19	7	4
	USA-Nebraska	24	22	12	8
Blé	Suède	40	17	12	4
	USA-Oklahoma	15	6	x	x
Colza	Danemark	13	15	9	4
	Allemagne	10	12	10	4

Tableau A.III-4 : Exemple d'évolution de la production de maïs aux États-Unis (adapté de Food and Agricultural Policy Research Institute, 2009b)

Activité (unité)	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Surface cultivée (hectare)	3,18E +07	3,20E +07	3,25E +07	3,26E +07	3,28E +07	3,30E +07	3,34E +07	3,37E +07	3,37E +07	3,37E +07	3,36E +07
Augmentation surface année +1		2,19E +05	5,04E +05	7,93E +04	2,18E +05	1,28E +05	3,92E +05	3,41E +05	3,47E +04	6,55E +04	4,01E +04
Production (Millier tonnes)	3,07E +05	3,14E +05	3,23E +05	3,28E +05	3,34E +05	3,39E +05	3,47E +05	3,55E +05	3,61E +05	3,64E +05	3,68E +05
Production (t)	3,07E +08	3,14E +08	3,23E +08	3,28E +08	3,34E +08	3,39E +08	3,47E +08	3,55E +08	3,61E +08	3,64E +08	3,68E +08
Rendement moyen (t/ha)	9,66	9,79	9,92	10,05	10,16	10,29	10,41	10,55	10,69	10,82	10,94
Augmentation du rendement année +1		0,13	0,13	0,13	0,11	0,13	0,12	0,14	0,14	0,13	0,12

Tableau A.III-5 : Types d'augmentation de la production de maïs aux États-Unis

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
X = augmenta tion par superficie (t)	2,11E +06	4,93E +06	7,87E +05	2,19E +06	1,30E +06	4,03E +06	3,55E +06	3,66E +05	- 7,00E +05	- 4,33E +05
Y = augmenta tion par rendemen t (t)	4,17E +06	4,23E +06	4,24E +06	3,61E +06	4,29E +06	4,00E +06	4,72E +06	4,72E +06	4,38E +06	4,04E +06
T = Productio n année antérieure + X + Y (t)	6,28E +06	9,16E +06	5,03E +06	5,80E +06	5,59E +06	8,03E +06	8,27E +06	5,09E +06	3,68E +06	3,60E +06

Tableau A.III-6 : Proportions entre augmentation par surface et par rendement de la culture du maïs aux États-Unis

	Augmentation totale depuis 2009	Part sur le total
X = augmentation par superficie	1,81E+07	<b>0,29962</b>
Y = augmentation par rendement	4,24E+07	<b>0,70038</b>
T = Production année antérieure + X + Y	6,05E+07	

Tableau A.III-7 : Proportions entre augmentation par surface et par rendement de la culture du maïs au Canada

	Augmentation totale depuis 2009	Part sur le total
X = augmentation par superficie	1,32E+06	<b>0,543</b>
Y = augmentation par rendement	1,11E+06	<b>0,457</b>
T = Production année antérieure + X + Y	2,43E+06	

Tableau A.III-8 : Proportions entre augmentation par surface et par rendement de la culture du maïs en Chine

	<b>Augmentation totale depuis 2009</b>	<b>Part sur le total</b>
X = augmentation par superficie	1,13E+07	<b>0,476</b>
Y = augmentation par rendement	1,24E+07	<b>0,524</b>
T = Production année antérieure + X + Y	2,37E+07	

## ANNEXE IV – Processus supplémentaires pour les impacts de l'ACV-C

Tableau A.IV-1 : Récapitulatif des processus supplémentaires pris en compte pour l'extension des frontières

Corn, at farm /US U
Urea, as N, at regional storehouse /RER U
Fertilising, by broadcaster /CH U
Transport, lorry 20-28t, fleet average /CH U
Transport, freight rail/RER U
Transport, transoceanic freight ship/OCE U
Occupation, as arable
Transformation from arable
Transformation from pasture and meadow, extensive
Transformation, from shrub land
Transformation to forest, intensive, short cycle

Tableau A.IV-2 : Exemple d'adaptation du processus de culture de maïs

	Canada			USA	Chine	
	/0,935 kg maïs	/1kg maïs	/ 1kg orge	/1kg maïs	/0,560kg maïs	/1kg maïs
<b>DALY</b>	2,55E-07	2,73E-07	4,39E-07	2,55E-07	2,55E-07	4,55E-07
<b>PDF*m2*an</b>	-1,17E-01	-1,25E-01	2,45E-01	-1,17E-01	-1,17E-01	-2,09E-01
<b>kg CO2 eq</b>	3,30E-01	3,53E-01	3,55E-01	3,30E-01	3,30E-01	5,90E-01
<b>MJ primaires</b>	3,93E+00	4,20E+00	3,08E+00	3,93E+00	3,93E+00	7,02E+00

Tableau A.IV-3 : Types de terres transformés dans les pays (adapté de US EPA, 2009)

<b>Pays</b>	<b>Forêt</b>	<b>Prairies</b>	<b>Savane</b>	<b>Prairies recouvertes d'arbustes</b>
Argentine	8%	40%	45%	8%
Brésil	4%	18%	74%	4%
Chine	17%	38%	23%	21%
EU	27%	16%	36%	21%
Inde	7%	7%	33%	53%
Indonésie	34%	5%	58%	4%
Malaisie	74%	3%	19%	3%
Nigeria	4%	56%	36%	4%
Philippines	49%	5%	44%	3%
Afrique du Sud	10%	22%	53%	15%

Tableau A.IV-4 : Émissions de GES (MT CO<sub>2</sub>eq / acre) sur 80 ans dues à la transformation des terres (adapté de US EPA, 2009)

<b>Région</b>	<b>Vers</b>	<b>De</b>			
		<b>Forêt</b>	<b>Prairies</b>	<b>Savane</b>	<b>Prairies recouvertes d'arbustes</b>
Chine	Culture	237	23	34	49
	Prairies	186	x	x	27
	Savane	240	x	x	27
Europe	Culture	318	28	38	47
	Prairies	216	x	x	22
	Savane	181	x	x	14

## ANNEXE V – Tableaux de résultats des simulations GTAP

Tableau A.V-1 : Variation de la production par secteur et par zone pour une augmentation de 1%  
de la demande en grains (gro) au Canada

qo	Oceania	EastAsia	SEAsia	SouthAsia	CAN	USA	MEX
Land	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
UnSkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Capital	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NatRes	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
pdr	-2,22E-04	1,30E-04	-6,00E-05	4,30E-05	-2,09E-01	-4,84E-04	1,08E-03
wht	6,49E-03	3,04E-03	4,55E-03	6,16E-04	-7,34E-02	5,18E-03	6,76E-03
gro	1,66E-03	1,47E-03	5,44E-04	1,66E-04	6,04E-01	1,22E-02	2,51E-04
v_f	1,80E-05	7,00E-05	1,14E-04	2,28E-04	-4,04E-02	3,05E-04	1,59E-03
osd	1,38E-04	1,39E-03	6,41E-04	1,24E-04	-3,90E-02	6,98E-04	6,04E-03
c_b	3,51E-04	7,10E-05	5,55E-04	4,30E-05	5,05E-03	5,48E-04	1,59E-04
pfb	-2,71E-04	3,57E-04	1,29E-04	-1,33E-04	-5,20E-03	-1,17E-03	-3,53E-04
ocr	-3,62E-04	7,56E-04	2,61E-04	9,90E-05	-3,59E-02	-1,11E-03	3,38E-04
pcr	1,98E-04	-6,00E-06	-1,29E-04	1,60E-05	-2,55E-01	1,97E-04	3,32E-04
ctl	3,04E-03	5,54E-04	3,32E-04	6,50E-05	-4,28E-02	1,43E-03	2,05E-03
oap	2,26E-03	5,10E-04	3,57E-04	-2,00E-05	-5,36E-02	1,16E-03	4,53E-04
rmk	4,52E-04	5,40E-05	3,61E-04	-4,10E-05	-3,18E-02	3,13E-04	1,00E-04
wol	7,95E-04	2,45E-03	1,15E-03	5,43E-04	-8,90E-01	2,71E-03	2,21E-03
cmt	5,13E-03	7,96E-04	3,48E-04	1,06E-03	-3,96E-02	1,32E-03	3,75E-03
omt	1,19E-03	1,42E-03	3,88E-04	5,78E-04	-5,01E-02	8,21E-04	1,50E-03
Extraction	-2,33E-04	1,40E-05	3,00E-06	-2,80E-05	1,75E-03	-3,50E-05	2,20E-05
ProcFood	3,30E-04	1,28E-04	6,56E-04	1,34E-04	-3,22E-02	5,63E-04	1,14E-04
TextWapp	-7,06E-04	-6,30E-05	-1,03E-04	-2,75E-04	7,76E-03	-3,06E-04	4,09E-04
LightMnfc	-4,33E-04	-1,66E-04	-1,64E-04	-2,00E-04	6,36E-03	-3,58E-04	-4,41E-04
HeavyMnfc	-6,58E-04	1,00E-05	-1,19E-04	-7,50E-05	6,35E-03	-1,98E-04	-9,70E-05
Util Cons	9,70E-05	-1,50E-05	-1,90E-05	1,60E-05	-1,84E-03	1,01E-04	-9,10E-05
TransComm	-3,00E-05	-1,10E-05	-1,50E-05	-3,00E-05	-1,63E-04	-2,00E-06	-2,00E-06
OthServices	-1,50E-05	-1,00E-05	-2,30E-05	-3,10E-05	1,85E-04	-7,00E-06	-5,30E-05
CGDS	1,78E-04	-1,70E-05	-1,70E-05	2,80E-05	-3,29E-03	1,94E-04	-8,61E-04

qo	NAmerica	LatinAmer	EU_25	MENA	SSA	RestofWorld
Land	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
UnSkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Capital	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NatRes	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
pdr	-3,58E-04	2,70E-04	1,18E-03	8,70E-05	2,38E-04	1,41E-04
wht	3,63E-03	5,88E-03	4,19E-03	3,05E-03	5,44E-03	1,50E-03
gro	1,77E-04	1,91E-03	7,08E-04	1,25E-03	2,69E-04	3,71E-04
v f	4,86E-04	6,74E-04	4,17E-04	3,10E-04	1,96E-04	1,15E-04
osd	-4,40E-04	1,32E-03	1,32E-03	5,86E-04	7,38E-04	8,70E-04
c b	-3,14E-04	8,10E-05	2,02E-04	4,60E-05	7,60E-05	1,20E-04
pfb	6,60E-05	-1,18E-04	1,31E-04	2,48E-04	6,34E-04	3,72E-04
ocr	1,28E-04	3,00E-04	5,21E-04	1,09E-03	7,55E-04	4,16E-04
pcr	1,55E-03	-1,39E-04	3,51E-04	-1,87E-04	-7,10E-05	1,81E-04
ctl	7,75E-04	5,02E-04	4,98E-04	2,12E-04	2,00E-04	1,92E-04
oap	2,52E-03	6,53E-04	5,41E-04	1,33E-04	2,32E-04	2,36E-04
rmk	-3,13E-04	1,92E-04	1,40E-04	7,70E-05	1,00E-05	3,40E-05
wol	2,81E-03	6,06E-04	8,48E-03	7,72E-04	1,41E-03	2,79E-03
cmt	4,68E-04	6,50E-04	4,86E-04	2,36E-04	3,86E-04	3,15E-04
omt	2,80E-05	6,06E-04	5,87E-04	2,24E-04	1,93E-04	5,34E-04
Extraction	-1,86E-04	-8,90E-05	-1,70E-05	-3,00E-06	-4,00E-05	-1,30E-05
ProcFood	-4,16E-04	2,48E-04	2,18E-04	7,50E-05	1,19E-04	1,52E-04
TextWapp	-3,41E-04	-3,92E-04	6,00E-06	-3,90E-05	-1,84E-04	-6,30E-05
LightMnfc	-3,82E-04	-4,32E-04	-1,03E-04	-2,59E-04	-2,35E-04	-9,40E-05
HeavyMnfc	-3,41E-04	-3,08E-04	-7,30E-05	-5,60E-05	-2,23E-04	-8,60E-05
Util_Cons	2,74E-04	2,40E-05	2,90E-05	4,00E-06	-1,20E-05	6,00E-06
TransComm	-6,00E-06	-5,90E-05	1,00E-06	-3,90E-05	-7,40E-05	-1,90E-05
OthServices	3,90E-05	-2,40E-05	-1,60E-05	-4,10E-05	-4,90E-05	-2,60E-05
CGDS	6,95E-04	8,80E-05	6,30E-05	2,40E-05	5,20E-05	4,30E-05

Tableau A.V-2 : Variation de la production par secteur et par zone pour une augmentation de 10% de la demande en grains (gro) au Canada

qo	Oceania	EastAsia	SEAsia	SouthAsia	CAN	USA	MEX
Land	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
UnSkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Capital	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NatRes	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
pdr	-2,08E-03	1,29E-03	-6,17E-04	4,31E-04	-2,11E+00	-4,90E-03	1,09E-02
wht	6,69E-02	3,08E-02	4,62E-02	6,26E-03	-7,48E-01	5,29E-02	6,88E-02
gro	1,67E-02	1,47E-02	5,44E-03	1,65E-03	6,04E+00	1,22E-01	2,47E-03
v_f	2,88E-04	7,15E-04	1,16E-03	2,32E-03	-4,08E-01	3,38E-03	1,62E-02
osd	2,09E-03	1,41E-02	6,48E-03	1,26E-03	-3,98E-01	7,32E-03	6,18E-02
c_b	3,53E-03	7,05E-04	5,56E-03	4,26E-04	4,97E-02	5,50E-03	1,59E-03
pfb	-2,75E-03	3,64E-03	1,27E-03	-1,35E-03	-5,30E-02	-1,18E-02	-3,59E-03
ocr	-3,34E-03	7,73E-03	2,69E-03	1,01E-03	-3,66E-01	-1,11E-02	3,43E-03
pcr	2,00E-03	-5,60E-05	-1,31E-03	1,66E-04	-2,55E+00	2,05E-03	3,36E-03
ctl	3,07E-02	5,56E-03	3,32E-03	6,58E-04	-4,30E-01	1,43E-02	2,05E-02
oap	2,29E-02	5,15E-03	3,60E-03	-2,05E-04	-5,40E-01	1,17E-02	4,54E-03
rmk	4,56E-03	5,43E-04	3,62E-03	-4,14E-04	-3,20E-01	3,13E-03	9,71E-04
wol	1,57E-03	2,10E-02	1,04E-02	5,05E-03	-7,56E+00	1,87E-02	1,93E-02
cmt	5,19E-02	7,99E-03	3,48E-03	1,07E-02	-3,99E-01	1,33E-02	3,76E-02
omt	1,21E-02	1,43E-02	3,91E-03	5,83E-03	-5,06E-01	8,29E-03	1,51E-02
Extraction	-2,34E-03	1,37E-04	3,20E-05	-2,80E-04	1,77E-02	-3,53E-04	2,23E-04
ProcFood	3,35E-03	1,29E-03	6,57E-03	1,35E-03	-3,23E-01	5,65E-03	1,11E-03
TextWapp	-7,02E-03	-6,00E-04	-1,06E-03	-2,79E-03	7,83E-02	-3,10E-03	4,12E-03
LightMnfc	-4,35E-03	-1,67E-03	-1,65E-03	-2,01E-03	6,41E-02	-3,61E-03	-4,45E-03
HeavyMnfc	-6,60E-03	1,00E-04	-1,20E-03	-7,55E-04	6,40E-02	-2,01E-03	-9,80E-04
Util_Cons	9,75E-04	-1,46E-04	-1,93E-04	1,60E-04	-1,86E-02	1,02E-03	-9,28E-04
TransComm	-2,97E-04	-1,11E-04	-1,50E-04	-3,08E-04	-1,65E-03	-2,30E-05	-2,10E-05
OthServices	-1,47E-04	-1,02E-04	-2,26E-04	-3,08E-04	1,90E-03	-6,90E-05	-5,32E-04
CGDS	1,80E-03	-1,67E-04	-1,76E-04	2,81E-04	-3,32E-02	1,96E-03	-8,71E-03



qo	NAmerica	LatinAmer	EU_25	MENA	SSA	RestofWorld
Land	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
UnSkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
SkLab	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Capital	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
NatRes	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
pdr	-3,61E-03	2,70E-03	1,19E-02	8,65E-04	2,40E-03	1,42E-03
wht	3,70E-02	5,99E-02	4,26E-02	3,10E-02	5,53E-02	1,52E-02
gro	1,76E-03	1,90E-02	7,08E-03	1,25E-02	2,69E-03	3,70E-03
v_f	4,98E-03	6,91E-03	4,23E-03	3,15E-03	2,00E-03	1,17E-03
osd	-4,41E-03	1,35E-02	1,34E-02	5,94E-03	7,53E-03	8,86E-03
c_b	-3,15E-03	7,90E-04	2,03E-03	4,59E-04	7,60E-04	1,21E-03
pfb	6,64E-04	-1,23E-03	1,31E-03	2,50E-03	6,38E-03	3,76E-03
ocr	1,32E-03	3,09E-03	5,29E-03	1,11E-02	7,70E-03	4,24E-03
per	1,51E-02	-1,41E-03	3,54E-03	-1,91E-03	-7,37E-04	1,82E-03
ctl	7,79E-03	5,03E-03	5,01E-03	2,12E-03	2,01E-03	1,93E-03
oap	2,54E-02	6,57E-03	5,45E-03	1,34E-03	2,34E-03	2,38E-03
rmk	-3,14E-03	1,91E-03	1,41E-03	7,72E-04	1,01E-04	3,35E-04
wol	2,25E-02	3,90E-03	7,66E-02	7,30E-03	1,32E-02	2,63E-02
cmt	4,71E-03	6,51E-03	4,89E-03	2,37E-03	3,87E-03	3,17E-03
omt	2,93E-04	6,08E-03	5,93E-03	2,26E-03	1,95E-03	5,39E-03
Extraction	-1,86E-03	-9,05E-04	-1,77E-04	-3,50E-05	-4,00E-04	-1,34E-04
ProcFood	-4,18E-03	2,46E-03	2,19E-03	7,49E-04	1,19E-03	1,53E-03
TextWapp	-3,43E-03	-3,97E-03	5,40E-05	-4,15E-04	-1,88E-03	-6,46E-04
LightMnfc	-3,83E-03	-4,37E-03	-1,04E-03	-2,62E-03	-2,37E-03	-9,43E-04
HeavyMnfc	-3,43E-03	-3,11E-03	-7,35E-04	-5,62E-04	-2,26E-03	-8,65E-04
Util_Con	2,75E-03	2,36E-04	2,97E-04	3,60E-05	-1,22E-04	6,10E-05
TransComm	-6,00E-05	-5,94E-04	1,00E-05	-4,00E-04	-7,54E-04	-1,90E-04
OthServices	3,92E-04	-2,39E-04	-1,57E-04	-4,14E-04	-5,00E-04	-2,58E-04
CGDS	6,98E-03	8,87E-04	6,41E-04	2,44E-04	5,27E-04	4,33E-04

Tableau A.V-3 : Variation de la production de grains (gro) pour une augmentation de 10% de la demande en grains au Canada

<b>qo[gro*]</b>	<b>(Sim)</b>	<b>Pre</b>	<b>Post</b>	<b>Ch/%Ch</b>
<b>Oceania</b>	0,01668	1247,76477	1247,9729	0,20813
<b>EastAsia</b>	0,01474	10034,01172	10035,49121	1,47949
<b>SEAsia</b>	0,00544	3589,73096	3589,92627	0,19531
<b>SouthAsia</b>	0,00165	5984,24268	5984,3418	0,09912
<b>CAN</b>	6,04076	1484,59387	1574,27466	89,68079
<b>USA</b>	0,12185	24110,57227	24139,95117	29,37891
<b>MEX</b>	0,00247	7647,74658	7647,93555	0,18896
<b>NAmerica</b>	0,00176	9,93054	9,93072	0,00018
<b>LatinAmer</b>	0,01905	11634,73047	11636,94629	2,21582
<b>EU_25</b>	0,00708	20000,40039	20001,81641	1,41602
<b>MENA</b>	0,01253	4595,79688	4596,37256	0,57568
<b>SSA</b>	0,00269	13474,39551	13474,75781	0,3623
<b>RestofWorld</b>	0,0037	19117,61914	19118,32617	0,70703

Tableau A.V-4 : Variation de la production de grains (gro) pour une augmentation de 10% de la demande en grains aux États-Unis

<b>qo[gro*]</b>	<b>(Sim)</b>	<b>Pre</b>	<b>Post</b>	<b>Ch/%Ch</b>
<b>Oceania</b>	0,53489	1247,76477	1254,43884	6,67407
<b>EastAsia</b>	0,32611	10034,01172	10066,7334	32,72168
<b>SEAsia</b>	0,06322	3589,73096	3592,00024	2,26929
<b>SouthAsia</b>	0,02698	5984,24268	5985,85693	1,61426
<b>CAN</b>	1,76467	1484,59387	1510,79211	26,19824
<b>USA</b>	6,42139	24110,57227	25658,80469	1548,23242
<b>MEX</b>	0,08174	7647,74658	7653,99756	6,25098
<b>NAmerica</b>	0,08392	9,93054	9,93888	0,00833
<b>LatinAmer</b>	0,25373	11634,73047	11664,25098	29,52051
<b>EU_25</b>	0,07474	20000,40039	20015,34961	14,94922
<b>MENA</b>	0,23045	4595,79688	4606,38818	10,59131
<b>SSA</b>	0,02339	13474,39551	13477,54785	3,15234
<b>RestofWorld</b>	0,04992	19117,61914	19127,16211	9,54297

## ANNEXE VI – Contribution des pays dans les impacts de l'extension de frontières

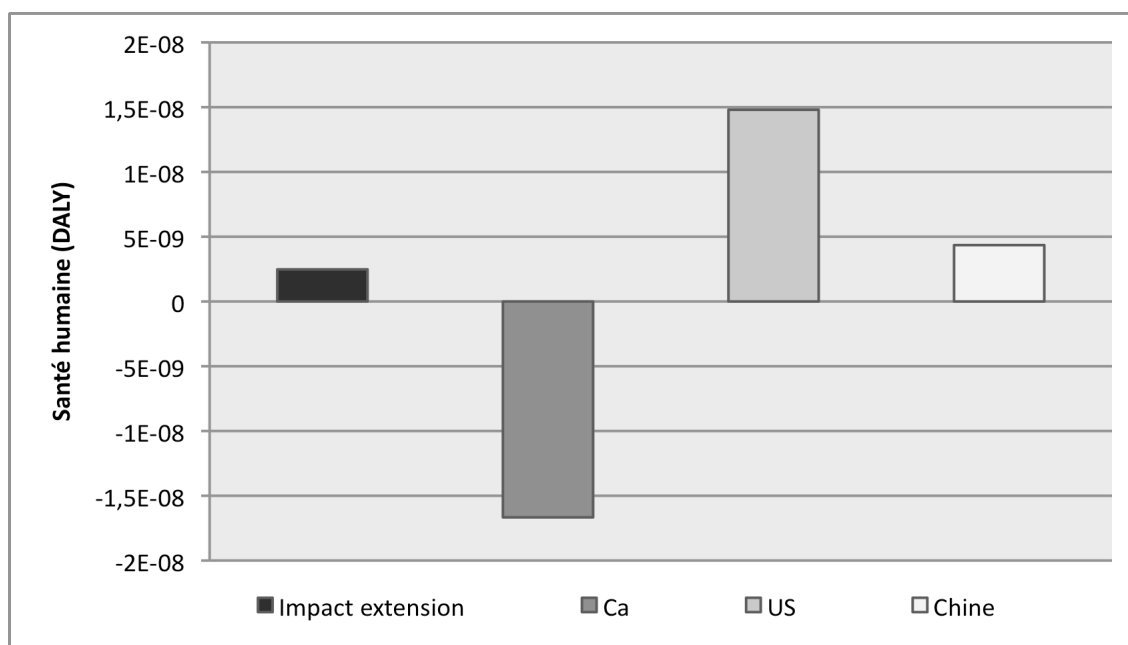


Figure A.VI-1 : Contribution des pays dans les résultats (ACV-C santé humaine)

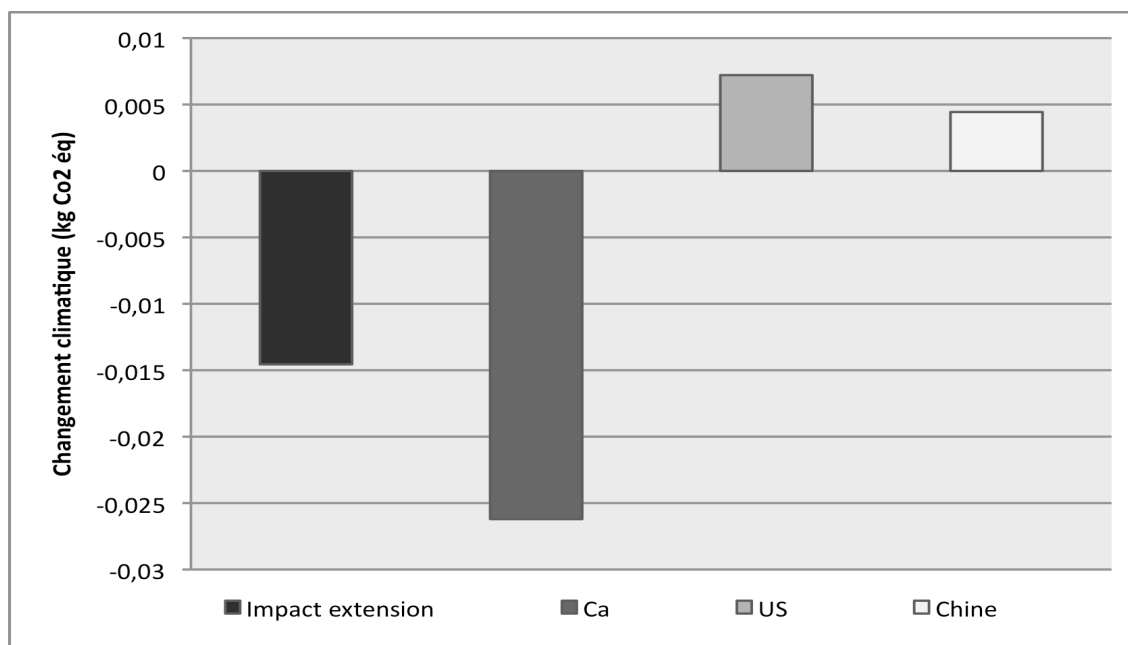


Figure A.VI-2 : Contribution des pays dans les résultats (ACV-C changement climatique)

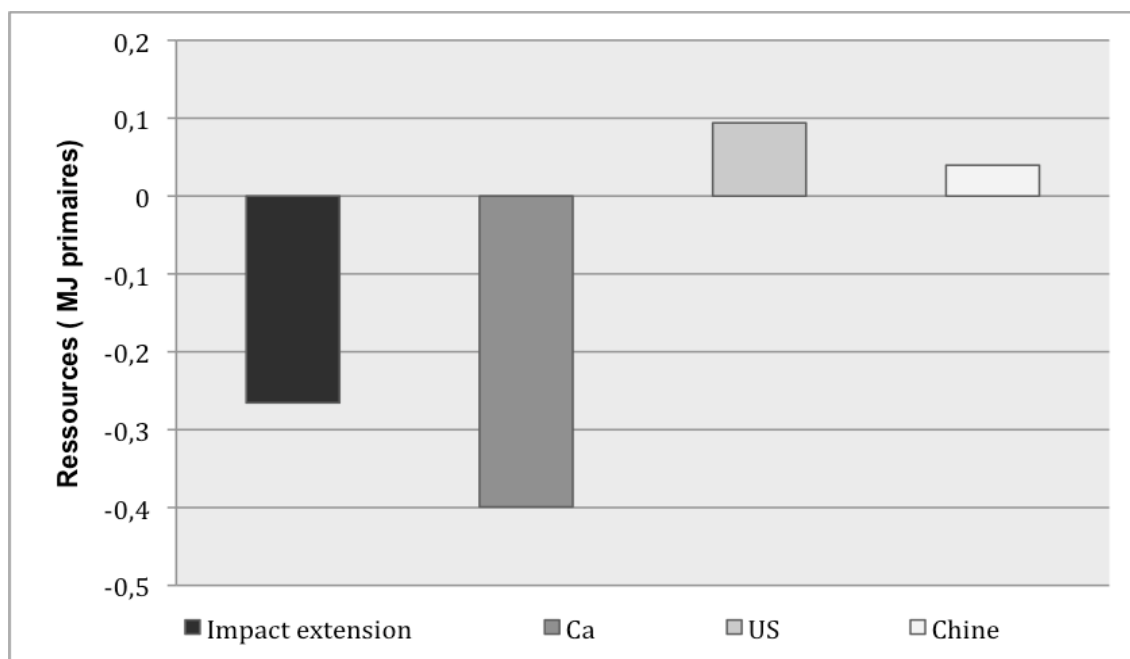


Figure A.VI-3 : Contribution des pays dans les résultats (ACV-C ressources)

Les impacts dénommés ici « Impact extension » correspondent seulement aux impacts « supplémentaires » de l’extension de frontières. Ils ne prennent pas en compte les impacts originaux du système de produits E85 saule, et ne sont donc pas le résultat final des impacts de l’ACV-C du système de produits E85 saule.